



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de chimie industrielle

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**TEBINA NARIMENE**

Le : dimanche 26 juin 2022

## IMPACT FINESSE DE CIMENT SUR LE TEMPS DE PRISE ET LE DURCISSEMENT DU MORTIER

---

### Jury :

Pr.	HASSEINE ABDELMALEK	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	LAIADI DJEMOUI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Pr.	MARZOUGUI ABDELKRIME	Pr	Université de Biskra	Examineur


Année universitaire : 2021 - 2022



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

Avant d'ouvrir ce travail, je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux qui ma donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Paix

et salut soient sur son **prophète Mohamed**  qui sera toujours pour nous un modèle.

Au terme de la réalisation de cette mémoire de fin d'étude, je tiens à remercier mon encadrent **DR.LAIADI DJEMOUI** enseignant à l'université de Biskra pour la direction et l'encadrement de ma thèse, il a été patient avec moi, il m'a donné de précieux conseils et m'a toute sa présence tout au long de ce travail, je le remercie énormément pour sa gentillesse.

Mes remerciements vont également aux membres de jury : **PR.HASSEINE ABD ELMALEK** et **PR. MARZOUGUI ABDELKRIME** qui me font l'honneur d'examiner mon travail.

Je remercie chaleureusement les travailleurs de la société SPA BISKRIA, qui m'a ouvert leurs portes et donné l'opportunité de réaliser ce projet et plus particulièrement **Mr AHMED BAITECHE** le directeur de performance, et **Mr AHMED GHEDDABI**, et **M<sup>elle</sup> AMANI LOUAM**, et toute l'équipe de performance et à tous ceux qui m'ont aidé durant mon stage pratique.

Je tiens à remercier également l'ensemble du corps enseignants département de Chimie industriel de l'université de Biskra.

# *Dédicace*

*Avec l'aide de Dieu, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie:*

*A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenue et m'ont donné la force.*

*Je leur souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

*A ma sœur et mes frères, qui ont toujours été là pour moi et dont le soutien inconditionnel et les encouragements ont été d'une grande aide.*

*A toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours.*

*A toutes mes amies pour leur encouragement permanent et leur soutien moral.*

*A toutes les personnes qui m'ont encouragé tout au long de mes études*

### Résumé

Le ciment est l'un des matériaux de base dans la construction et qui est affecté par de nombreux facteurs lors de sa fabrication, dans ce travail, nous nous concentrerons sur sa finesse et son impact sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques.

L'objectif de ce travail consiste à préparer un ciment (clinker OPC+gypse) avec le pourcentage en  $SO_3$  est de 3%. Afin d'étudier l'influence du temps de broyage (30, 45, 60, 75, 90 min) sur les caractéristiques du ciment (Composition chimique, surface spécifique, finesse, consistance des pâtes de ciment, et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés par ces ciments, telles que, le comportement mécanique du mortier. (Résistances mécaniques à la compression et à la flexion).

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que le temps de broyage est un paramètre principal qui influe sur les caractéristiques du ciment préparé et l'augmentation des résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers testés.

**Mots clés :** Ciment, Finesse, Propriétés physico-mécaniques, Temps de broyage.

### Abstract

Cement is one of the basic materials in construction and is affected by many factors during its manufacture, in this work we will focus on its fineness and impact on physical, mechanical and chemical properties.

The objective of this work is to prepare a cement (clinker OPC+gypsum) with the percentage in  $SO_3$  is 3%. In order to study the influence of the grinding time (30, 45, 60, 75, 90 min) on the characteristics of the cement (chemical composition, specific surface, fineness, consistency of the cement paste, and setting time), as well as the characteristics of the mortars prepared by these cements, such as, the mortar's mechanical behaviour. (Mechanical resistance to compression and bending).

Based on the experimental results obtained, it appears that the crushing time is a main parameter that influences the characteristics of the prepared cement and the increase in mechanical resistance (bending and compression) of the mortars tested.

**Keywords:** Cement, Finesse, Physical-mechanical properties, Grinding time.

**ملخص**

الأسمنت من المواد الأساسية في البناء والذي يتأثر بالعديد من العوامل أثناء تصنيعه، في هذا العمل نهتم بدراسة النعومة وتأثيرها على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية.

الهدف من هذا العمل هو تحضير الاسمنت (الكلنكر OPC + الجبس) يحتوي على SO<sub>3</sub> بنسبة 3 ٪ من أجل دراسة تأثير وقت الطحن (30,45,60,75,90 دقيقة) على خصائص الأسمنت (التركيب الكيميائي , السطح المحدد , النعومة , تناسق عجينة الاسمنت ، ووقت الإعداد) , وكذلك خصائص الملاط المحضر بواسطة هذه العينات , مثل السلوك الميكانيكي للملاط (مقاومة ميكانيكية للضغط والانحناء)

وفقاً للنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها, يبدو أن وقت الطحن هو عامل رئيسي يؤثر على خصائص الأسمنت المحضر وزيادة المقاومة الميكانيكية (الانحناء والضغط) للملاط المختبر.

**الكلمات المفتاحية :** الاسمنت , النعومة , خواص فيزيائية ميكانيكية , زمن الطحن

Figure	Titre	Page
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE CIMENT</b>		
Figure I.1	Poudre de ciment	6
Figure I.2	Ingrédients du ciment	7
Figure I.3	Roche de calcaire	8
Figure I.4	Argile	9
Figure I.5	Oxyde de fer	10
Figure I.6	Poudre de Gypse ( $\text{CaSO}_4$ )	10
Figure I.7	Bauxite ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	11
Figure I.8	Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales	12
Figure I.9	PROCEDES ET TECHNIQUES DE FABRICATION DU CIMENT	13
Figure I.10	LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT	14
Figure I.11	Le structure de concasseur	15
Figure I.12	La polaire à l'intérieur	16
Figure I.13	Les polaires à l'extérieur	16
Figure I.14	Le hall de pré homogénéisation à l'intérieur	16
Figure I.15	Le hall de pré homogénéisation à l'extérieur	16
Figure I.16	le Doseur	17
Figure I.17	Broyeur cru	17
Figure I.18	Schéma d'un broyeur cru à boulets.	18
Figure I.19	Schéma d'un broyeur cru vertical	18
Figure I.20	La tour de préchauffage	19
Figure I.21	Schéma de tour échangeuse	19
Figure I.22	Four rotatif.	21
Figure I.23	Le refroidisseur	21
Figure I.24	L'intérieur de refroidisseur	21
Figure I.25	Un Silo de stockage de clinker.	22
Figure I.26	Le VCM.	22
Figure I.27	silos de stockage de ciment	23
Figure I.28	salle de contrôle	23
Figure I.29	L'expédition	24
Figure I.30	l'expédition en sac	24
Figure I.31	l'expédition en VRAC	24
<b>CHAPITRE II : FINESSE DE PRODUIT FINIS</b>		
Figure II.1	Broyeur à boulet	31
Figure II.2	Corps broyeur (les boulets )	31
Figure II.3	Broyeur vertical à galets	32
Figure II.4	Flux thermique dégagé par une pâte de ciment Portland en cours d'hydratation.	33



**CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES**

<b>Figure III.1</b>	Clinker	<b>39</b>
<b>Figure III.2</b>	GYPSE	<b>39</b>
<b>Figure III.3</b>	Presse hydraulique	<b>40</b>
<b>Figure III.4</b>	Broyeur à disque	<b>40</b>
<b>Figure III.5</b>	Pastille de clinker	<b>41</b>
<b>Figure III.6</b>	Pastille de Gypse	<b>41</b>
<b>Figure III.7</b>	Appareil de fluorescence X.	<b>42</b>
<b>Figure III.8</b>	Broyeur à boulets laboratoire	<b>45</b>
<b>Figure III.9</b>	les échantillons obtenus après le broyage	<b>45</b>
<b>Figure III.10</b>	Les étapes de détermination de la PAF	<b>46</b>
<b>Figure III.11</b>	CALCIMETRE	<b>47</b>
<b>Figure III.12</b>	Tamis de 45 µm et 90 µm	<b>49</b>
<b>Figure III.13</b>	Appareil Alpine	<b>49</b>
<b>Figure III.14</b>	Appareil Perméabilimètre de Blaine	<b>51</b>
<b>Figure III.15</b>	Principe de fonctionnement du PERMIABILIMETRE de Blaine	<b>51</b>
<b>Figure III.16</b>	Appareille de VICAT muni de la sonde de consistance	<b>54</b>
<b>Figure III.17</b>	appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible	<b>56</b>
<b>Figure III.18</b>	Granulométrie laser (MASTERSIZER E300)	<b>58</b>
<b>Figure III.19</b>	Moule des Mortier	<b>59</b>
<b>Figure III.20</b>	Table à choc	<b>60</b>
<b>Figure III.21</b>	Les éprouvettes démoulées	<b>61</b>
<b>Figure III.22</b>	Armoire Humide	<b>61</b>
<b>Figure III.23</b>	Appareil de résistance à la flexion	<b>62</b>
<b>Figure III.24</b>	Appareil de résistance à la compression	<b>63</b>

**CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION**

<b>Figure IV.1</b>	Evolution de la Surface Spécifique de Blaine en fonction de temps de broyage	<b>65</b>
<b>Figure IV.2</b>	La variation de Refus en fonction de temps de broyage.	<b>66</b>
<b>Figure IV.3</b>	Courbe d'évolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de la surface spécifique de Blaine (SSB	<b>67</b>
<b>Figure IV.4</b>	Temps de prise en fonction de SSB (cm <sup>2</sup> /g)	<b>68</b>
<b>Figure IV.5</b>	Histogramme de la résistance normale à la compression et à la flexion en fonction de SSB (cm <sup>2</sup> /g).	<b>70</b>
<b>Figure IV.6</b>	Courbe des résultats d'échantillon 1	<b>71</b>
<b>Figure IV.7</b>	Courbe des résultats d'échantillon 2	<b>72</b>
<b>Figure IV.8</b>	Courbe des résultats d'échantillon 3	<b>73</b>
<b>Figure IV.9</b>	Courbe des résultats d'échantillon 4	<b>73</b>
<b>Figure IV.10</b>	Courbe des résultats d'échantillon 5	<b>74</b>

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE CIMENT</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires.	<b>9</b>
<b>Tableau I.2</b>	Composition chimique du clinker	<b>11</b>
<b>Tableau I.3</b>	Compositions minéralogiques moyenne du clinker	<b>12</b>
<b>Tableau I.4</b>	Liste des différents types de ciments courants normalisés par NF P 15- 301	<b>25</b>
<b>Tableau I.5</b>	Classes de résistance du ciment	<b>26</b>
<b>Tableau I.6</b>	Domaine d'utilisation de différent ciment	<b>29</b>
<b>CHAPITRE II : FINESSE DE PRODUIT FINIS</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Produits d'hydratation du clinker	<b>35</b>
<b>CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES</b>		
<b>Tableau III.1</b>	Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire (OPC) par XRF	<b>42</b>
<b>Tableau III.2</b>	Composition chimique du GYPSE Par XRF	<b>43</b>
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION</b>		
<b>Tableau IV.1</b>	Résultats de préparation d'échantillon	<b>64</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Résultats de surface spécifique de Blaine (SSB)	<b>64</b>
<b>Tableau IV.3</b>	Résultats de Refus	<b>65</b>
<b>Tableau IV.4</b>	Evolution de consistance normale du cinq échantillons	<b>67</b>
<b>Tableau IV.5</b>	Temps de prise	<b>68</b>
<b>Tableau IV.6</b>	Les compositions chimiques des cinq échantillons par XRF	<b>69</b>
<b>Tableau IV.7</b>	les analyses chimiques obtenues par les cinq échantillons	<b>69</b>
<b>Tableau IV.8</b>	Les résistances à la compression et à la flexion du ciment	<b>70</b>
<b>Tableau IV.9</b>	Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 1	<b>71</b>
<b>Tableau IV.10</b>	Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 2	<b>72</b>
<b>Tableau IV.11</b>	Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 3	<b>72</b>
<b>Tableau IV.12</b>	Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 4	<b>73</b>
<b>Tableau IV.13</b>	Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 5	<b>74</b>

## ABREVIATIONS

---

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
OPC	ORDINARY PORTLAND CEMENT
SSB	SURFACE SPECIFIQUE DE BLAINE
VCM	VERTICAL CUTTER MIXER
CEM	CEMENT
PAF	PERTE AU FEU
PSD	PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

DEDICACE	
REMERCIEMENT	
RESUME	
ملخص	
ABSTRACT	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE CIMENT</b>	
INTRODUCTION	3
I.1 DEFINITION DE BISKRIA CIMENT-SPA	3
I.1.1 les services de BISKRIA ciment	3
I.1.2 Les produits Fabriqué	4
I.2 DEFINITION DU CIMENT	5
I.2.1 Définition chimique (ciment non hydraulique)	5
I.2.2 Définition physique (ciment hydraulique)	5
I.3 INGRÉDIENTS DU CIMENT	6
I.3.1 Matières premières	7
I.3.1.1 Calcaires	7
I.3.1.2 L'argile	8
I.3.1.3 Eléments argileux calcaires	9
I.3.2 Les matières d'ajout	9
I.3.3 Matériaux de correction	10
I.3.3.1 Minerai de fer ( $Fe_2O_3$ )	10
I.3.3.2 Gypse ( $CaSO_4$ )	10
I.3.3.3 Bauxite ( $Al_2O_3$ )	11
I.3.3.4 Sable ( $SiO_2$ )	11
I.3.4 Produit semi- fini (CLINKER)	11
I.3.4.1 Définition	11
I.3.4.2 Composition chimique	11
I.3.4.3 Composition minéralogique	12
I.4 PROCEDES ET TECHNIQUES DE FABRICATION DU CIMENT	12

I.5 LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT	14
I.5.1 La carrier	14
I.5.2 Le Concassage	15
I.5.3 Le stockage de matières premières	16
I.5.4 Le broyage et le séchage	16
I.5.5 Préchauffage	18
I.5.6 Four rotatif	19
I.5.7 Refroidisseur	21
I.5.8 Silo stockage de clinker	21
I.5.9 Broyage ciment	22
I.5.10 Silo ciment	23
I.5-11 La salle de contrôle	23
I.5.12 L'expédition	24
I.6 TYPE DE CIMENT	25
I.6.1 La norme	25
I.6.2 La nomenclature du ciment	25
I.7 CLASSE DE RESISTANCE DU CIMENT	26
I.8 CARACTERISTIQUES DU CIMENT	26
I.8.1 Caractéristiques physiques	26
I.8.1.1 Prise	27
I.8.1.2 Durcissement	27
I.8.1.3 Fausse prise	27
I.8.1.4 Chaleur d'hydratation	27
I.8.1.5 Retrait	28
I.8.1.6. Gonflement	28
I.8.1.7 Expansion	28
I.8.1.8 Finesse de mouture	28
I.8.2 Caractéristiques mécaniques	28
I.8.2.1 Résistance mécanique	28
I.9 DOMAINE D'UTILISATION DE DEFERENT CIMENT	29

## **CHAPITRE II : LA FINESSE DE PRODUIT FINIS**

INTRODUCTION	30
--------------	----

II.1 LE BROYAGE DU CIMENT	30
II.1.1 Définition	30
II.1.2 TYPE DE BROYEUR	30
II.1.2.1 Broyeurs à boulets	30
II.1.2.2 Broyeur à galets	32
II.1.2.2.1 Principe de broyeur vertical à galets	32
II.1.2.2.2 Les paramètres influent sur l'efficacité du broyage	32
II.2 LA FINESSE	33
II.2.1 Définition	33
II.2.2 Comment mesurer la finesse	33
II.2.3 La relation entre la finesse et la résistance	33
II.3 HYDRATATION DE CIMENT	33
II.3.1 Hydratation des silicates C3S et C2S	34
II.3.2 Hydratation d'aluminate C3A	34
II.3.3 Hydratation du C4AF	35
II.3.4 La relation entre la finesse et l'hydratation de ciment	35
II.4 LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DE CIMENT	36
II.4.1 La prise	36
II.4.2 La durcissement	36
II.4.3 Les paramètres influençant sur le temps de prise	37
II.4.3.1 Paramètres physique	37
II.4.3.2 Paramètres chimique	37

### **CHAPITRE III :MATERIELS ET PRODUITS**

INTRODUCTION	38
III.1 PREPARATION D'ECHANTILLONS	38
III.1.1 MATIERE PREMIERE	38
III.1.1.1 Clinker	38
III.1.1.1.1 Définition	38
III.1.1.2 Gypse	39
III.1.1.2.1 Définition	39
III.1.1.2.2 Rôle	39
III.1.2 PREPARATION DES PASTILLES	40
III.1.2.1 Matériels utilisé	40

III.1.2.2 Mode opératoire	40
III.1.2.2.1 Pastille de Clinker	40
III.1.2.2.2. Pastille de GYPSE	41
III.1.3 ANALYSE PAR SPECTROMETRIE DE FLUROSCENCE X (XRF)	41
III.1.3.1 Définition	41
III.1.3.2 But	42
III.1.3.3 Mode opératoire	42
III.1.4 ESSAIS DE FABRICATION D'UN CIMENT LABORATOIRE TYPE CEMI	43
III.1.4.1 Définition	43
III.1.4.2 But	43
III.1.4.3.Mode opératoire	43
III.1.4.4 Rôle de SO <sub>3</sub>	43
III.1.5 BROYAGE	45
III.1.5.1 .Définition	45
III.1.5.2 Le broyeur à boulets	45
III.1.5.3 Mode opératoire	45
III.2 METHODE CHIMIQUE	46
III.2.1 Détermination de la perte au feu à 950 C°	46
III.2.1.1 Définition	46
III.2.1.2 Mode opératoire	46
III.2.2 Détermination de la chaux libre	47
III.2.2.1 Définition	47
III.2.2.2 Mode opératoire	47
III.2.3 Détermination de Chlore	48
III.2.3.1 Définition	48
III.2.3.2 Principe	48
III.2.3.3 Mode opératoire	48
III.3 METHODE PHYSIQUE	49
III.3.1 Refus	49
III.3.1.1 Définition	49
III.3.1.2 But	49
III.3.1.3 Mode opératoire	49
III.3.2 Surface spécifique de Blaine SSB	50
III.3.2.1 Définition	50

III.3.2.2 But	50
III.3.2.3 Mode opératoire	50
III.3.3 La consistance normale	52
III.3.3.1 Définition	52
III.3.3.2.La Pâte normale	52
III.3.3.3Matériels utilisé	52
III.3.3.4 Mode opératoire	53
III.3.4 Essais de prise	55
III.3.4.1 Définition	55
III.3.4.2 Matériels utilisé	55
III.3.4.3 Mode opératoire	55
III.4 METHODE MECANIQUE	57
III.4.1 Granulométrie laser – PSD	57
III.4.1.1 Définitions de la Granulométrie	57
III.4.1.2 Principe	57
III.4.1.3 Mode opératoire	57
III.4.2 La Résistance (flexion –compression)	58
III.4.2.1 Définition	58
III.4.2.2 But	58
III.4.2.3 Les Conditions de l’essai	58
III.4.2.4 Préparation du mortier	59
III.4.2.4 .1 Mode opératoire	59
III.4.2.5 Préparation des éprouvettes	59
III.4.2.5.1 Mode opératoire	59
III.4.2.6 Essais des éprouvettes	62
III.4.2.6.1 Résistance à la flexion	62
III.4.2.6.2. Résistance à la compression	63

## **CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

INTRODUCTION	64
IV.1- PREPARATION D’ECHANTILLONS	64
IV.2 ANALYSES PHYSIQUE	64
IV.2.1 Surface spécifique de Blaine (SSB)	64
IV.2.2 Le Refus	65



IV.2.3 : La consistance normale de ciment E/C	<b>66</b>
IV.2.4 Le temps de prise	<b>67</b>
IV.3 ANALYSES CHIMIQUE	<b>69</b>
IV.3.1 Spectrométrie de fluorescence X (XRF)	<b>69</b>
IV.3.2 Perte au feu, Chlore, Chaux libre FCaO	<b>69</b>
IV.4 ANALYSES MECANIQUE	<b>70</b>
IV.4.1 Résistance à la Compression et à la flexion	<b>70</b>
IV.4.2 Granulométrie laser - PSD	<b>71</b>
IV.4.2.1 Echantillon 1 :30min	<b>71</b>
IV.4.2.2 Echantillon 2 : 45 min	<b>72</b>
IV.4.2.3 Echantillon 3 :60 min	<b>72</b>
IV.4.2.4 Echantillon 4 : 75 min	<b>73</b>
IV.4.2.5 Echantillon 5 : 90 min	<b>74</b>
CONCLUSION GENERALE	<b>75</b>
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	<b>76</b>
ANNEXE	

# INTRODUCTION GENERALE



Le ciment est une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

Le ciment aurait d'abord été inventé par les Égyptiens, qui a été améliorée par les civilisations suivantes par l'ajout de chaux à de l'argile. Les Grecs d'Italie le renforcèrent avec des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques de la région de Pouzzoles), et cet usage a été repris et généralisé par les Romains. Jusqu'à l'époque moderne, le ciment est un liant, souvent une chaux, additionnée d'adjuvant comme les tuiles ou briques concassées, dont l'argile possède des propriétés hydrauliques. La pouzzolane (terre volcanique de Pouzzoles, dans la région de Naples, en Italie) est très utilisée comme adjuvant. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIX<sup>e</sup> siècle, lorsque Louis Vicat identifia le phénomène d'hydraulicité des chaux en 1817, et celle des ciments, qu'il appelait chaux éminemment hydrauliques, ou chaux limites, en 1840.

[1]

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits de béton sur chantier ou en usine.

Exigences climatiques, résistances à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié. Pour faire ce choix, il est important de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévus par la normalisation.

Les réactions du ciment Portland permettent de lier les différentes particules de ciment et de granulat ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions dont la grandeur dépend de la composition du ciment. La dynamique des réactions va dépendre de nombreux facteurs tels que finesse de mouture, composition, ajout d'éléments secondaires (gypse par exemple). Ces propriétés liées aux réactions doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à sa mise en forme. Elles doivent aussi permettre au produit de durcir dans un temps suffisamment court pour pouvoir poursuivre les travaux de construction.[4]

Ce travail consiste à étudier l'effet du taux de broyage, de la finesse et de la surface spécifique sur les propriétés physico-mécaniques et chimiques de ciment fabriqués au sein de laboratoire de l'entreprise BISKRIA ciment.

Le présent manuscrit sanctionnant ce travail est entamé par cette introduction générale qui donne une idée sur l'importance et l'intérêt du thème abordé, tout en soulignant les objectifs visés.

Le premier chapitre est constitué d'une revue bibliographique donnant une présentation générale sur le ciment.

Le deuxième chapitre est consacré sur l'influence du temps de broyage et la finesse sur les propriétés physico-chimique de ciment.

Le troisième chapitre mentionnera les détails expérimentaux utilisés lors de cette étude dans le but de déterminer les propriétés chimique et physico-mécanique de ciment.

Dans le dernier chapitre on présentera les résultats et discussion obtenus à partir de différentes expériences sur les échantillons étudiés.

Cette mémoire se termine par une conclusion générale sur l'ensemble des résultats issus de cette étude.

# CHAPITRE I

## GENERALITE SUR LE CIMENT



‘ Tout est possible à qui rêve, ose, travaille et n’abandonne jamais’ Xavier Dolan

Le premier chapitre présente cette dernière en la citant les différents départements de production, leur capacité de production et leurs produits fabriqués, des généralités du ciment à partir de ses caractéristiques et de son industrie.

## I.1 DEFINITION DE BISKRIA CIMENT-SPA

L'Algérie est un marché d'importance stratégique pour la société BISKRIA Ciment dans le Bassin méditerranéen. Le secteur de la construction en Algérie a connu une croissance importante depuis l'an 2000, ce qui a déclenché la nécessité en matériaux de construction et solutions constructives.

La société cimentière « BISKRIA CIMENT » est une société par actions (S.P.A), de droit privé de droit algérien, créée en janvier 2009 au capital social de 4 284 000 000 DA. L'activité principale de l'entreprise est la production et la vente de ciment. Elle est constituée d'une entité unique située au siège social. Ses actionnaires sont tous des opérateurs économiques privés en Algérie. La cimenterie couvre une superficie de 100 hectares et est située à 18 kilomètres au nord-est de la capitale provinciale de BISKRA et à 5 kilomètres au sud de la ville de BRANIS. Ses principales matières premières proviennent du gisement de calcaire du JEBEL M'HOR à environ 2 km et du gisement d'argile D'ETAREF à 15 km [2].



### I.1.1 les services de BISKRIA ciment

La cimenterie possède de 3 lignes de productions (2 ligne ciment gris, 1 ligne ciment blanc en projet) avec une capacité totale de 4 million T/an. La S.P.A BISKRIA CIMENT procède trois secteurs principaux :

- 1- Secteur administratif : contient de services administratifs pour gérer la société
- 2- Secteur technique: contient les trois lignes de production d'une capacité de 4 million T/an.
- 3- Secteur commerciale : contient le service de vente et d'expédition [3]

### I.1.2 Les produits Fabriqués

Tous les produits sont conformes à la norme algérienne (NA442A6-2013) [2].

#### **CEM I 42,5 R:**

Ciment portland, pour les bétons hautes performance et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid en hiver

Composition : 95 % à 100% de clinker (k)

complément à 100% de sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.



#### **CEM II/A-L 42,5 R: Ciment portland au calcaire**

Ciment gris pour béton à performances élevées, il procure une utilisation confortable du au temps de prise idéale, destiné à la construction dans le bâtiment, le génie civil, ainsi dans la préfabrication.

Composition 80 % à 94 % de clinker (KK)

complément à 100% du calcaire (L)



#### **CEM II/B-L 32.5 R Ciment portland au calcaire**

CEM II/B-L 32.5 R Ciment gris destiné aux travaux de bâtiment, génie civil industriel et routier

Composition 65 % à 79% de clinker (KK)

complément à 100% du calcaire (L)



#### **CEM I 42,5 R SR3 (CRS)**

Ciment portland résistant au sulfate

Un Ciment gris résistant aux sulfates, pour la réalisation de béton mortiers, béton-armé ou non-armé en hivers comme en été, lorsqu'une résistance aux Sols agressives est préconisée

Composition : au moins 95 % de clinker (KK)

Ajouts : la proportion de constitutions secondaires est limitée à 5%



## I.2 DEFINITION DU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique durcissant dans l'eau, qui après hydratation présente un degré de solubilité très faible. Ce ciment, se présentant sous forme d'une très fine poudre, possède la propriété d'agglomérer des matériaux solides inertes après mélange à l'eau en leur assurant une cohésion et adhésion très fortes.

D'après la norme "AFNOR", le ciment est défini comme étant une matière finement broyée composée d'un pourcentage de clinker portland et d'ajouts (gypse, pouzzolane,...)

D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être défini comme un mélange d'oxyde basique CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO<sub>2</sub> noté S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> noté A, ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> noté F, en notation cimentaire. [4]

**I.2.1 Définition chimique (ciment non hydraulique) :** un ciment artificiel est un produit résultant de la cuisson de mélanges artificiels (par la main de l'homme) de silice, d'alumine et de carbonate de calcium (chaux), sur lequel l'eau n'a aucune action (ou seulement une action particulièrement lente avant trituration) et qui, réduites mécaniquement en poudre, durcissent sous l'effet de l'eau en des temps variables selon leur qualité [5].

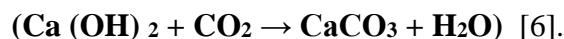
Le ciment non hydraulique est produit selon les étapes suivantes (cycle de la chaux) :

1. Calcination : La chaux est produite à partir de calcaire à plus de 825°C pendant environ 10 heures.  $(\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2)$

2. L'extinction : L'oxyde de calcium est mélangé avec de l'eau pour faire de la chaux éteinte.  $(\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2)$

3. Réglage : L'eau est complètement évaporée.

4. Le ciment est exposé à l'air sec et il durcit après de longues réactions.



**I.2.2 Définition physique (ciment hydraulique) :** le ciment est un liant hydraulique sous forme de poudre fine qui est à base de calcaire et d'argile utilisé qui prend par addition d'eau. Il durcit rapidement et atteint sa résistance maximale en quelques jours. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau [5].

le ciment hydraulique est principalement constitué de silicates et d'oxydes :

1. Bélite (2CaO•SiO<sub>2</sub>).

2. Alite (3CaO•SiO<sub>2</sub>).

3. Aluminate tricalcique/ Cérite (3CaO•Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

4. Brownmillerite (4CaO•Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>•Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [6].



- **Il existe trois grandes catégories de ciments hydrauliques :**
- **Les ciments Portland :** constitués majoritairement de silice et de chaux, est une poudre de grains anhydres essentiellement composée de clinker et de sulfate de calcium dans un rapport massique d'environ 95-5%. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire dans une proportion de 20-80%.
  - **Les ciments fondus :** sont une alternative intermédiaire entre les ciments portland et les ciments réfractaires.
  - **Les ciments alumineux :** forment le groupe des ciments réfractaire, le terme ciment alumineux fut utilisé quand ce type de ciment contenant 32-45% d' $Al_2O_3$ , a été utilisé après la guerre mondiale, pour le distinguer des ciments type portland qui contiennent moins d'alumine et plus de silice.[4]



**Figure I.1 :** Poudre de ciment

### **I.3 INGRÉDIENTS DU CIMENT**

- **On pose la question : De quoi est composé le ciment ?**

Minéralogiquement parlant, le ciment est essentiellement composé de quatre constituants :

- La chaux  $CaO$  (désignation simplifiée « C ») plutôt basique.
- Silice  $SiO_2$  (désignation simplifiée « S »).
- Alumine  $Al_2O_3$  (désignation simplifiée « A »).
- Oxyde de fer  $Fe_2O_3$  (désignation simplifiée "F") plutôt acide.[7].



Figure I.2: Ingrédients du ciment

### I.3.1 Matières premières :

On classe habituellement les matières premières naturelles en :

- **Calcaire:** plus de 80% de  $\text{CaCO}_3$ .
- **Argile:** moins de 40% de  $\text{CaCO}_3$ .
- **Éléments argilo- calcaires:** de 40% à 80% de  $\text{CaCO}_3$ .

#### I.3.1.1 Calcaires

Les calcaires peuvent être de pureté et de duretés variables, ils proviennent du dépôt de  $\text{CaCO}_3$  contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisés par l'intermédiaire d'organismes vivants (mollusques, algues). Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins.

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont: la silice, la magnésie, le fer, les alcalis. La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la

décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un dégagement du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). [5]

On classe les calcaires comme suit :

- **Calcaire dur** : On attribue ce nom au calcaire contenant un minimum de 80 % de  $\text{CaCO}_3$  et un maximum de 5 % de  $\text{MgCO}_3$ . Les calcaires durs sont imperméables à l'eau.
- **Calcaire craie** : Blanchâtre, tendre et friable plus de 90% de  $\text{CaCO}_3$ , c'est une roche meuble formée par l'accumulation d'algues microscopiques. [3]



**Figure I .3:** Roche de calcaire

### I.3.1.2 L'argile

L'argile est une roche sédimentaire, composée par une large part de minéraux spécifiques, silicates en générale, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée. Cette matière constitue essentiellement de silice ,d'alumine et de fer elle peut être sous forme d'argile résiduelle provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques ou d'argile transportée et déposée sous l'effet des mers , des cours d'eaux des glaciers et du vent .[5]

Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique on peut classer les argiles en différents groupes :

- Groupe de l'halloysite :  $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.4\text{H}_2\text{O}$ .
- Groupe de kaolin :  $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$ .
- Groupe de la montmorillonite :  $\text{Al}_2\text{O}_3.4\text{SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$
- Groupe des minéraux argileux micacés (séricite)
- Groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite). [3]



Figure I.4 : Argile

**I.3.1.3 Eléments argileux calcaires**

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d’argile afin de faire leur dosage.

Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportion voulu. Ces « pierres à ciment » sont évidemment très rare [5]

**I.3.2 Les matières d’ajout :**

Sont principalement :

- **Le Gypse :** Son rôle est de régulariser le temps de prise du ciment.
- **Le Calcaire :** Ajout qui diminue la résistance du ciment et qui peut être remplacé par la pouzzolane qui a les mêmes caractéristiques. [8].

Ces compositions diffèrent d’un ciment à l’autre selon la composition minéralogique voulue qui détermine les autres propriétés du produit fini (temps de prise, résistance mécanique, résistance aux sulfates, résistance à l’attaque de l’eau de mer...). Toutes ces propriétés sont définies pendant et après l’hydratation et le durcissement du ciment portland. [4].

**Tableau I.1:** Récapitulatif des avantages des ajouts cimentaires. [5]

Avantages techniques	Avantages économiques	Avantages écologiques
-Améliorer la maniabilité -Réduit la demande en eau -Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton. -Diminution de la chaleur d’hydratation dégagée du béton. -Diminue la fissuration d’origine thermique	-Leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation. -Réduit le prix du béton pour le coût du combustible.	-Diminution de l’émission du co2 par l’industrie cimentière -Elimination des sous-produits de la nature

### I.3.3 Matériaux de correction :

Des correcteurs, minerai de fer qui apporte  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , bauxite pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , calcaire pour  $\text{CaO}$ , sable pour  $\text{SiO}_2$  sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée du cru et le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ).

**I.3.3.1 Minerai de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) :** Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels. Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes.



**Figure I.5 :** Oxyde de fer

**I.3.3.2 Gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) :** Le gypse d'origine sédimentaire est une roche saline de la famille des évaporites. Il se forme également en milieu hydrothermal, ou comme produits d'oxydation de sulfures. Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate di hydraté de calcium de formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  .notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi- heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement.



**Figure I-6 :** Poudre de Gypse ( $\text{CaSO}_4$ )

**I.3.3.3 Bauxite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) :** La bauxite est une roche découverte en 1821 par Pierre Berthier aux Baux-de-Provence, près d'Avignon, d'où son nom. Elle est caractérisée par sa forte teneur en alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (environ 50% en masse du minerai) et en oxydes de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15% environ) qui donne sa couleur rouge au minerai et aussi de la silice SiO<sub>2</sub>(en général moins de 5 %). A partir de la bauxite, on produit l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dont l'électrolyse à l'état fondu permet d'obtenir l'aluminium.



**Figure I.7 :** Bauxite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

**I.3.3.4 Sable (SiO<sub>2</sub>) :** Le sable est avant tout un matériau naturel, issu du quartz ou du silice, largement utilisé dans le domaine de la construction. Le sable est constitué de grains plus ou moins fins, dont la dimension varie de 0,15 mm à 4,76 mm. En fonction de la taille des grains, on parle de sable fin, de gros sable ou de sable graveleux. Il existe ainsi différents types de sables, qui auront différentes utilisations en construction [4]

**I.3.4 Produit semi- fini (CLINKER):**

**I.3.4.1 Définition :**

Le clinker est le principal constituant des ciments courants. C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) vers 1450 °C d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire (80 % environ) et d'argile (20 % environ).

**I.3.4.2 Composition chimique :**

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO<sub>2</sub>), d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), représentant environ 95 % en masse.

La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau I.2. [11]

**Tableau I.2** Composition chimique du clinker

Composants du clinker	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Notation cimentière	C	A	F	S	M	S	K	N
Teneurs limites (%)	62-67	2-9	1-5	19-25	0-3	1-3	0,6	0,6



I.3.4.3 Composition minéralogique :

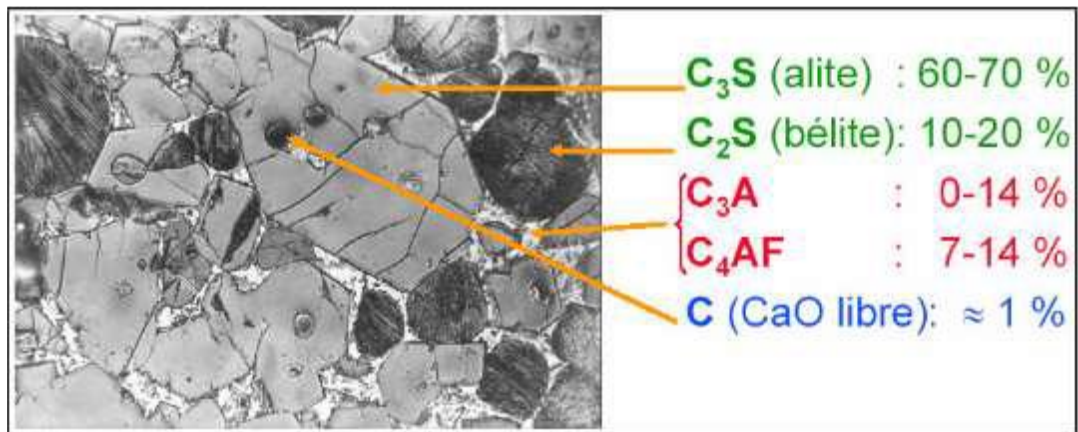


Figure I.8 : Micrographie de clinker montrant ses quatre phases cristallines principales [4]

Le ciment portland contient 4 principaux constituants sont :

- le silicate bicalcique (Bélite):  $2CaO, SiO_2$  ou par abréviation  $C_2S$ ,
- le silicate tricalcique(Alite) :  $3CaO SiO_2$  ou par abréviation  $C_3S$ ,
- L'aluminate tricalcique (Célite):  $3CaO Al_2O_3$  ou par abréviation  $C_3A$ ,
- L'alumino-ferrite tétracalcique(Célite) :  $4CaO Al_2O_3$  ou par abréviation  $C_4AF$ .

La composition minéralogique moyenne du clinker est comprise dans les limites suivantes (tableau I-3) [11]

Tableau I.3 : Compositions minéralogiques moyenne du clinker

Composants minéralogiques	Alite $C_3S$	Bélite $C_2S$	Célite $C_3A$	Célite $C_4AF$
Teneur en (%)	40 à 70%	10 à 30%	2 à 15%	0 à 15%

I.4 PROCEDES ET TECHNIQUES DE FABRICATION DU CIMENT

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : le procédé par voie sèche, le procédé par voie semi-sèche, le procédé par voie semi-humide et le procédé par voie humide.

- Dans le **procédé par voie sèche**, la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre des moyens importants de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...).

- Dans le **procédé par voie semi-sèche**, la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.
- Dans le **procédé par voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans le **procédé par voie humide**, la farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1er choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche.

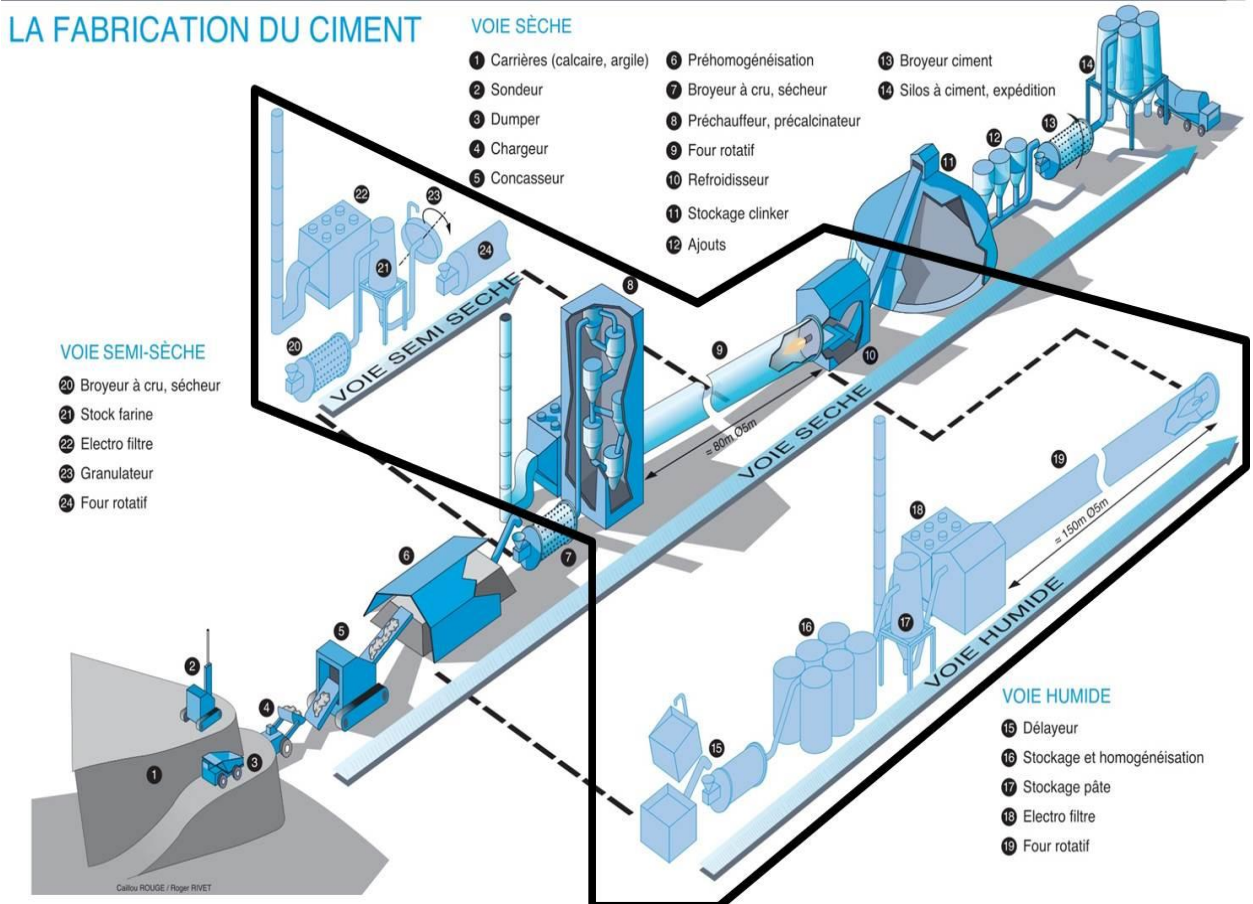


Figure I.9 : PROCÉDES ET TECHNIQUES DE FABRICATION DU CIMENT



### I.5 LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases.

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20 %. Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice  $\text{SiO}_2$ , l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , et l'oxyde ferrique  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nécessaires au processus de formation du clinker. Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésie  $\text{MgO}$ , des sulfates, des sulfures, des alcalis  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}_3$ , dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises.

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

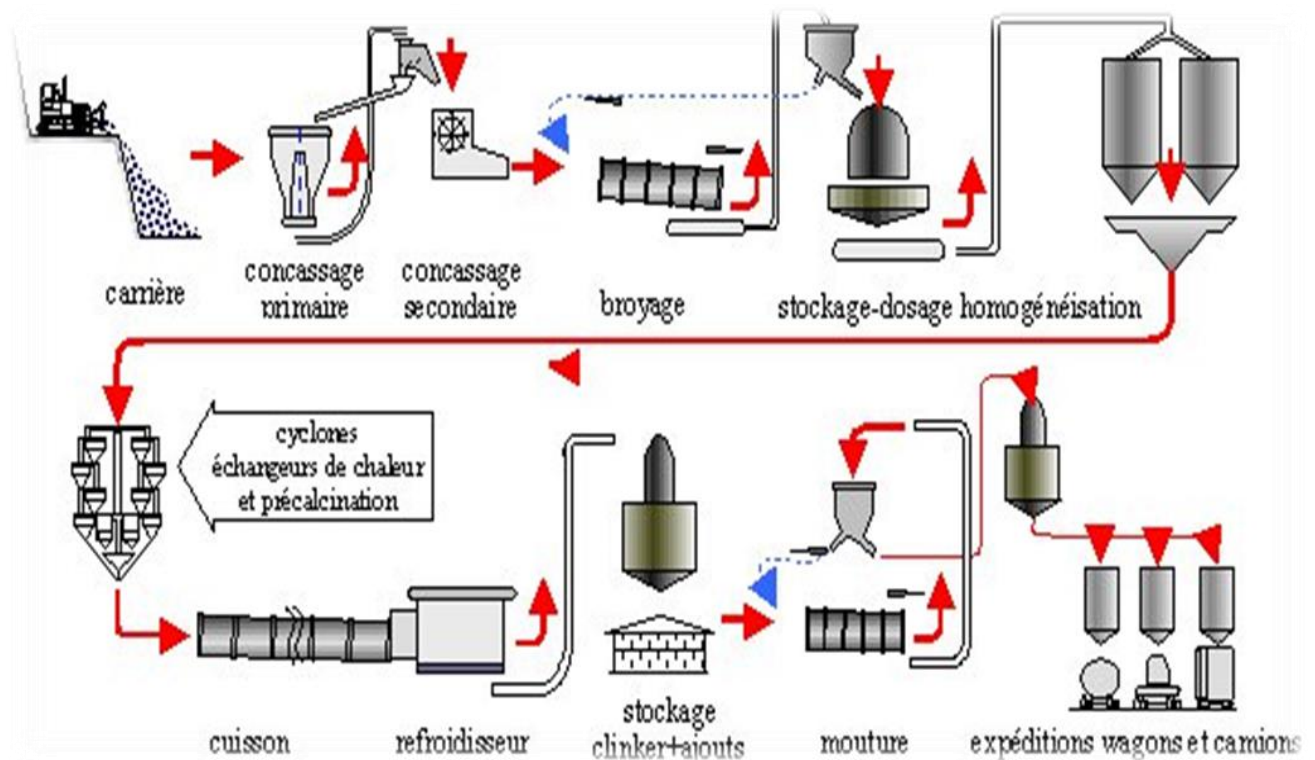


Figure I.10 : LES ETAPES DE FABRICATION DU CIMENT

#### I.5.1 La carrière

Toute usine existante ou toute implantation de nouvelle usine nécessite une connaissance approfondie des gisements de matières premières [9]. Le carrier en cimenterie constitue la source en matières premières qui subissent des transformations pour fabriquer le produit fini donc le ciment est fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer. Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, d'argiles, de minerai de fer et de sable.

Constituant la matière première principale, le calcaire est extrait d'une carrière située à proximité de l'usine, sous forme de blocs de dimensions très variées (~ 1 m<sup>3</sup>), pour réduire les coûts de

transport. Les argiles, constituent la matière première secondaire, le minerai de fer et le sable, sont des matières de correction utilisées dans des faibles proportions. Ces matières sont livrées par des fournisseurs.[3]

### I.5.2 Le Concassage

Les matériaux sont réduits par le concasseur à une taille maximum de 80mm. La roche est ensuite échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale. Le mélange est ensuite stocké dans un hall de pré homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement. Concassage et pré-homogénéisation.[3]

Les paramètres qui déterminent le choix d'un concasseur sont :

- La nature des matériaux de carrière : humidité, cohésion, composition chimique (silice) déterminant l'abrasivité du matériau
- La dimension du matériau entrant et la granulométrie souhaitée en sortie
- L'efficacité du concassage compte tenu de la nature des matériaux
- Les débits demandés
- L'investissement

Le concassage s'effectue en général en 2 étapes :

- Le concassage primaire qui réduit la taille des matériaux en blocs de 150 à 200 mm
- Le concassage secondaire qui réduit la taille en fragment de 20 à 35 mm, taille admissible par les broyeurs crus.[9]

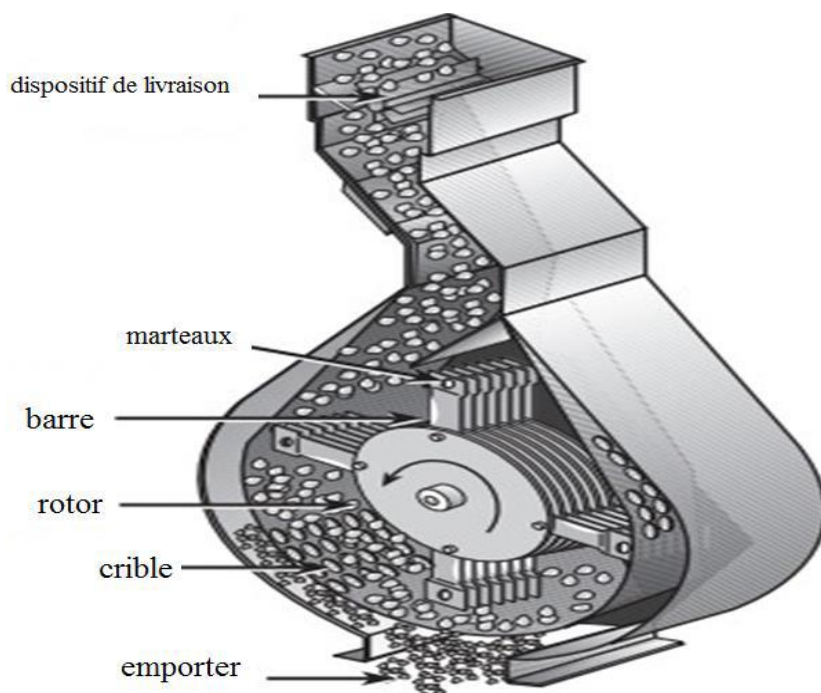


Figure I.11 : Le structure de concasseur

### I.5.3 Le stockage de matières premières

Après le concassage les matières concassé se déplace par des tapis roulant vers des zones spécifiées. Dans un usine de BISKRIA ciment il existe 2 zones de stockage, l'un pour stocker le calcaire (polaire) et autre pour stocker les ajouts (rectangulaire) .et la matière sera stocker par un stackeur [3]



**Figure I.12** La polaire à l'intérieur

**Figure I.13** Les polaires à l'extérieur



**Figure I.14** : Le hall de pré-homogénéisation à l'intérieur

**Figure I.15** : Le hall de pré homogénéisation à l'extérieur

### I.5.4 Le broyage et le séchage

La matière crue est constituée d'un mélange des différentes matières premières et de correction dans des proportions qui sont définies suivant les valeurs des modules chimiques du cru. En général, la matière crue est constituée de 75% de calcaire, 15% d'argile, et 5 % de matières de corrections (minerai de fer 5% ; sable 3%).



Le dosage des différentes composantes est systématisé de manière automatique à l'entrée du broyeur. Ce mélange est broyé et séché dans un broyeur horizontal à boulets ou vertical à galets. Cette opération de broyage permet de réduire la granulométrie du mélange. Le séchage de la matière crue à l'intérieur du broyeur est assuré par les gaz chauds du four. Ces gaz sont ensuite dépoussiérés dans un filtre à manches puis évacués dans l'atmosphère. Le séchage permet de réduire l'humidité de la farine à moins de 1%.

A la sortie du broyeur cru, le mélange des matières broyées, appelé farine crue est stocké dans un ou plusieurs silos de stockage et d'homogénéisation.

Dans ces silos, la farine crue est homogénéisée par soufflage d'air sur-pressé. Cette opération permet d'améliorer la régularité des caractéristiques de la farine crue afin d'obtenir ensuite un clinker de qualité régulière.[3]

ÉLÉMENTS CONTENUS DANS LE CRU [9]

SiO <sub>2</sub> (S)	}	Eléments principaux Eléments principaux
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (F)		
CaO (C)	}	Eléments mineurs Eléments mineurs
MgO (M)		
K <sub>2</sub> O (K)		
Na <sub>2</sub> O (N)		
SO <sub>3</sub>		



Figure I.16 le Doseur



Figure I.17 Broyeur cru.

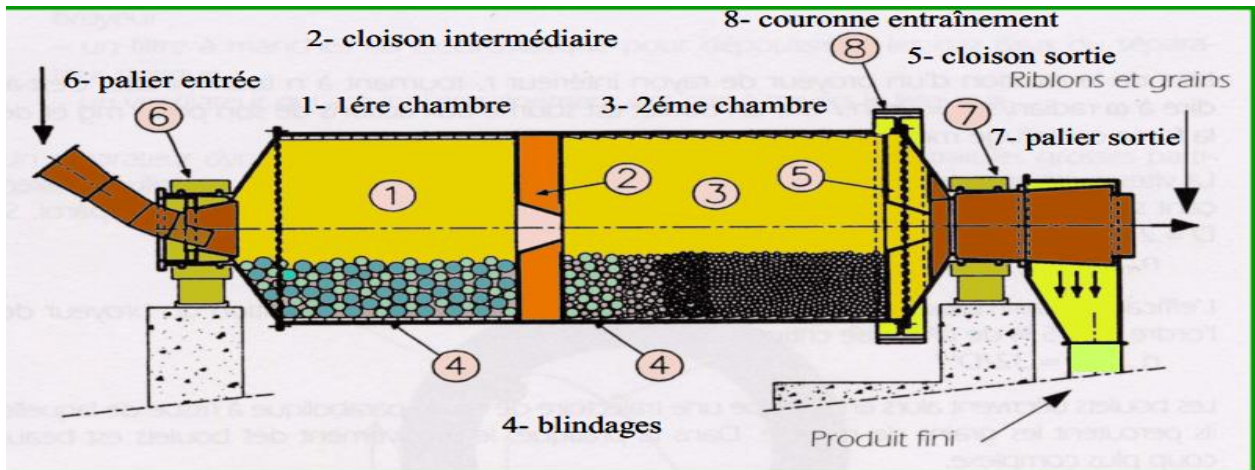


Figure I.18 Schéma d'un broyeur cru à boulets.

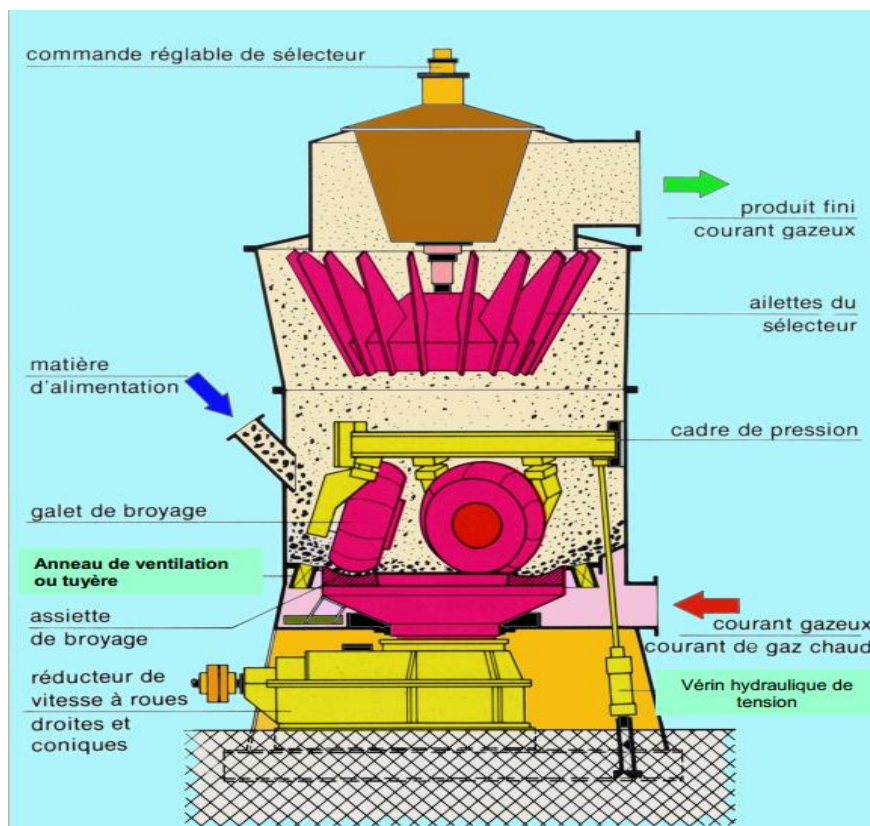


Figure I.19 Schéma d'un broyeur cru vertical

### I.5.5 Préchauffage

Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à sécher la matière crue. Dans la tour de préchauffage [3], La tour à cyclones est un échangeur de chaleur à voie sèche constituée de cinq étages. Elle permet d'effectuer un échange thermique[10], la farine crue avance du haut vers le bas et se mélange avec les gaz chauds du four circulant dans le sens inverse. Ce procédé permet de préchauffer la farine crue jusqu'à une température de près 800 °C.[3]



Figure I.20 La tour de préchauffage.

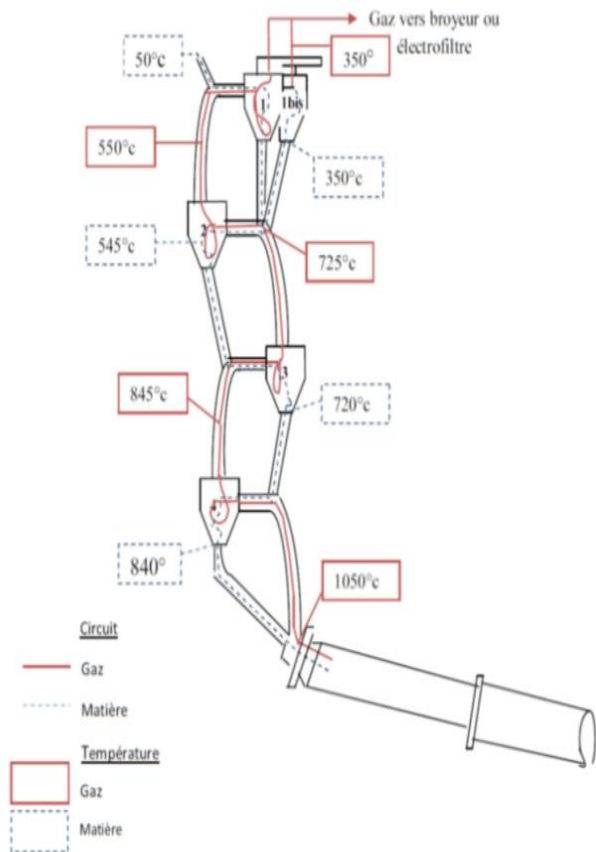


Figure I.21 Schéma de tour échangeuse [10]

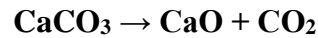
### I.5.6 Four rotatif

Les systèmes des fours sont conçus en cimenterie pour répondre aux exigences chimiques du procédé durant lequel la matière crue est transformée en clinker. Le four rotatif est un cylindre en acier reposant sur des stations de roulement, il est garni intérieurement par des produits réfractaires. Durant la cuisson, le four rotatif est animé d'un mouvement de rotation, la disposition en pente du four permet le mouvement de la matière première qui est injectée de l'autre extrémité par rapport à la flamme de chauffe. Durant ce déplacement, la matière se transforme par cuisson tout en avançant de son état initial jusqu'à ce qu'elle devienne "clinkérisée" à la température de 1450 °C.[3]

La farine crue est préchauffée puis passe au four : une flamme atteignant 2000 °C porte la matière à 1500 °C, avant qu'elle ne soit brutalement refroidie par soufflage d'air. Après cuisson de la farine, on obtient le clinker, matière de base nécessaire à la fabrication de tout ciment Les principales formations et réactions de la matière au cours de cuisson sont présentées par ces étapes suivantes:

- **Etape 1: Décarbonation :**

Le calcaire (CaCO<sub>3</sub>) est décomposé en oxyde de calcium (CaO) + gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Ce dernier est évacué par la cheminée.

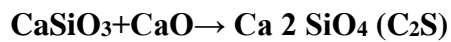
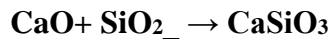


Pour 1 tonne (1000 kg) de CaCO<sub>3</sub>, on évacue par la cheminée 440 kg de CO<sub>2</sub>.

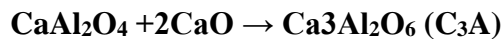
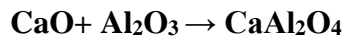
- **Etape 2 : Phase de transition**

Il y a la combinaison de CaO avec :

\_ Le silicium (Si) pour former du C<sub>2</sub>S (silicate bi calcique), cette réaction est légèrement exothermique.



\_ L'aluminium (Al) pour former une solution solide d'aluminates de calcium.



- **Etape 3 : Phase de cuisson**

La température de la matière monte jusqu'à 1450 °C. Une partie de la matière fond pour donner naissance à la phase liquide (constituée de phase aluminates et ferrite), cette étape demande beaucoup d'énergie. En parallèle, il y a formation de C<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) : à partir de 1300 °C, le C<sub>2</sub>S se transforme en C<sub>3</sub>S en réagissant avec une partie du Ca O non combiné. La réaction est exothermique. [8]





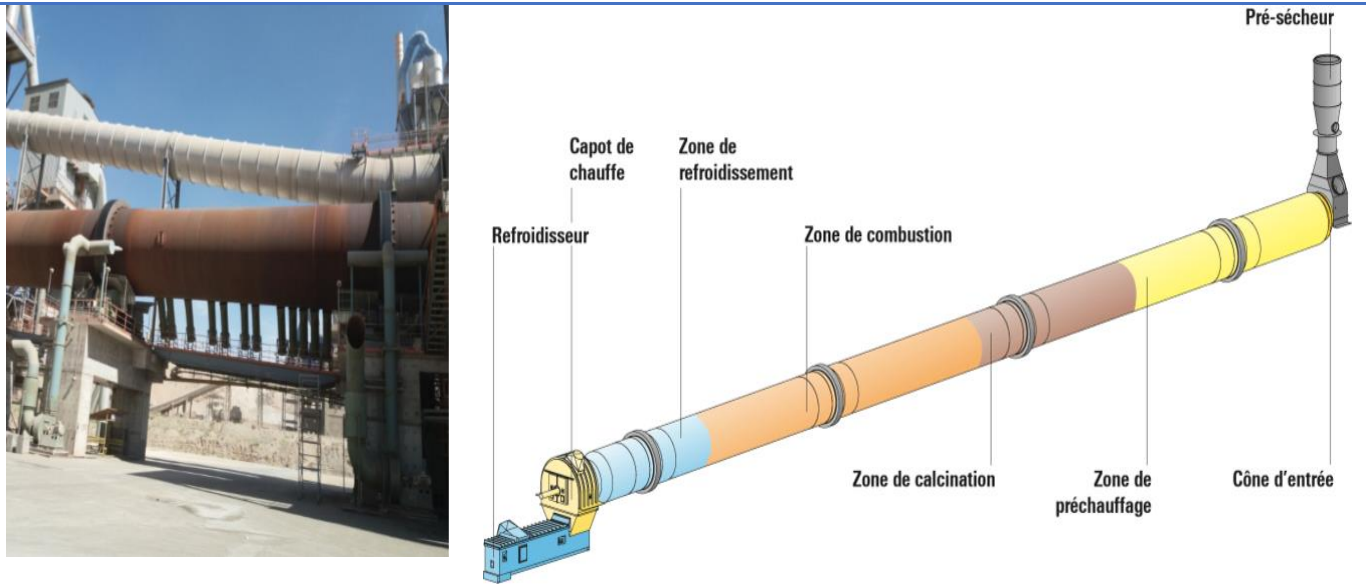


Figure I.22 : Four rotatif.

### I.5.7 Refroidisseur

A la sortie du four, le clinker est introduit dans un refroidisseur à ballonnets ou à grilles où il est refroidi jusqu'à une température de 120 °C. Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention jusqu'aux silos de stockage. [3]



Figure I.23 : Le refroidisseur.



Figure I.24 : L'intérieur de refroidisseur.

### I.5.8 Silo stockage de clinker

Le clinker issu du four est stocké dans des silos qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage ciment (étape suivante) une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunissent le clinker d'une dégradation physicochimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre [3]





**Figure I.25 :** Un Silo de stockage de clinker.

### **I.5.9 Broyage ciment**

Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment qui est d'une finesse inférieure à 40 microns. Le dosage du clinker, du gypse et des ajouts se fait à l'entrée du broyeur par un système de dosage automatique chargé d'effectuer des tests dans le laboratoire tout au long du processus de production. L'atelier de broyage comprend le broyeur, le séparateur (qui sélectionne les particules selon leur grosseur), le dépoussiéreur du broyeur et accessoirement la presse à rouleaux.[3]



**Figure I.26 :** Le VCM.

### I.5.10 Silo ciment

Après le broyage clinker, le clinker se déplace par un convoyeur vers le silo spéciale pour stocker le ciment.[3]



Figure I.27 : Silo de stockage de ciment

### I.5.11 La salle de contrôle

Les pilotes de la salle de contrôle conduisent l'usine depuis leurs écrans où s'affichent tous les informations. [3]

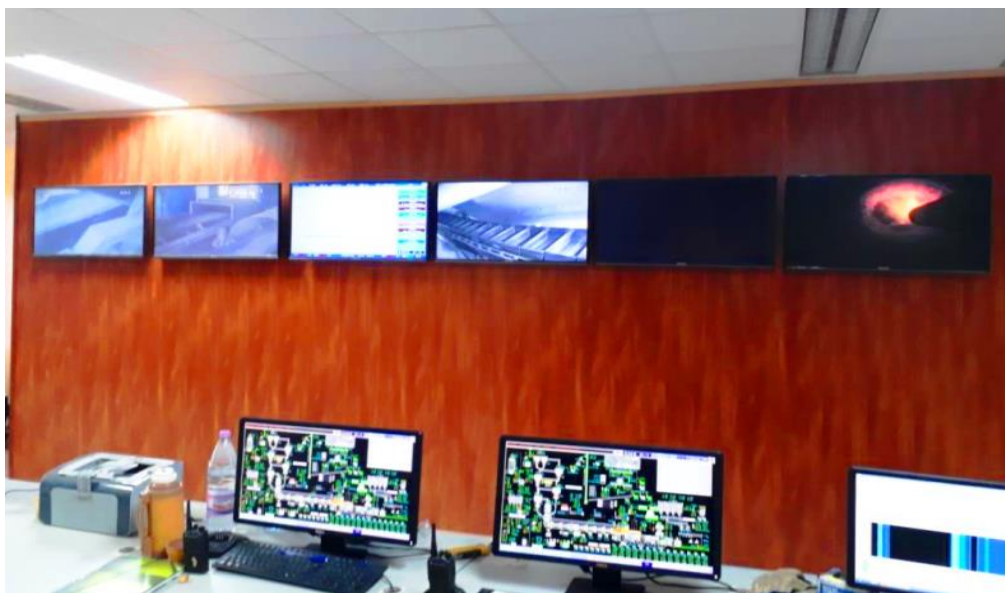


Figure I.28 : salle de contrôle



### I.5.12 L'expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de grands capacités qui alimentent par la suite les ateliers d'ensachage pour les l'expédition en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en VRAC. Donc les expéditions comprennent le stockage du ciment, son conditionnement (ensachage) en cas de livraison par sacs ou via un vrac et son chargement sur l'outil de transport (camion, train, bateau...), C'est l'interface de l'usine avec le client. [3]



Figure I.29 : L'expédition.

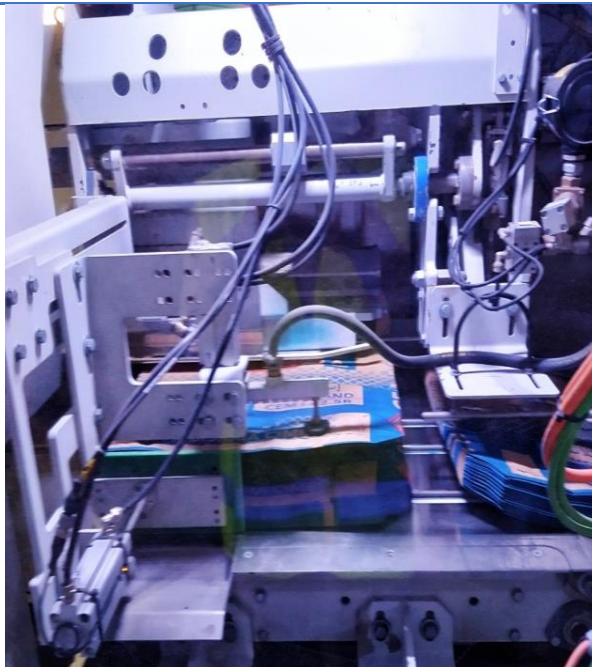


Figure I.30: l'expédition en sac



Figure I.31: l'expédition en VRAC

**I.6 TYPE DE CIMENT**

**I.6.1 La norme**

Toutes les normes algériennes sont élaborées par : L’institut Algérien de Normalisation (IANOR). Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normales, selon l’arrêté interministériel du 3 RABIE ETHANI 1424 correspondants au 4 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments. [5]

**I.6.2 La nomenclature du ciment [5]**

Une nomenclature régit le nom des produits industriels (ciments), afin de donner des indications sur sa composition, simplement à partir de son nom.

Exemple du ciment de BISKRIA: **CEM I / 42, 5 R**

Le premier chiffre romain **I** indique le type de ciment (composition).

Les chiffres **42, 5** indiquent la classe de résistance.

Enfin, la dernière lettre indique la résistance (soit **R** Rapide ou soit **N** normale).

L’industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- Résistances mécaniques
- Résistance à une attaque physique ou chimique
- Mise en œuvre particulière.

**Tableau I.4 :** Liste des différents types de ciments courants normalisés par NF P 15- 301

<i>Désignation</i>	<i>Types de ciment</i>	<i>Clinker %</i>	<i>Ajout E Teneurs en %</i>	<i>Matière secondaire</i>
<b>CEM I</b>	Ciment portland	95 à 100 %	-----	
<b>CEM II /A</b> <b>CEM II /B</b>	Ciment portland Composé	80 à 94 % 65 à 79 %	L’un desAjouts - 6 à 20% - 21 à 35 %	0 à 5%
<b>CEM III/A</b>	Ciment de haut Fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	Laitier - 35 à 65 % - 66 à 80% - 81 à 95 %	
<b>CEM IV/A</b> <b>CEM IV/B</b>	Ciment Pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	Pouzzolane, cendre, ou fumée de silice - 10 à35% - 36 à 55%	
<b>CEM V/ A</b> <b>CEM V/ B</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	Laitier - 18 à 30% Etcendre- 31 à 50%	

**I.7 CLASSE DE RESISTANCE DU CIMENT**

La norme **NA442** classe les ciments courant d’après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme **NA234**, mesurée à 28 jours, en six classes de résistance (tableau I.4). [5]

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 7 et à 28 jours.

La résistance du ciment est déterminée sur des éprouvette de mortier de ciment (Mortier normalisé ; sable/ ciment/ Eau). A chaque classe de résistance courante, correspondent trois (3) classes de résistance à court terme :

- une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N.
- une classe de résistance à court terme Elevée, notée R.
- une classe de faible résistance à court terme, notée L [4]

**Tableau I.5:** Classes de résistance du ciment

Classe de résistance	Résistance à la compression (M Pa)	
	2 jours Limite inf	28 jours Limite inf
32.5N (Normale)	-	≥ 32.5
32.5R (Rapide)	≥ 13.5	≥ 32.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5
52.5R	≥ 30	≥ 52.5

**I.8 CARACTERISTIQUES DU CIMENT [5]**

**I.8.1 .Caractéristiques physiques**

Comme cela a été étudié précédemment, le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C<sub>3</sub>S
- Silicate bicalcique : C<sub>2</sub>S
- Aluminate tricalcique : C<sub>3</sub>A ;
- Ferro-Aluminate tetracalcique: C<sub>4</sub>AF.

Une fois la poudre de ciment mélangé à l’eau, les réactions d’hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions

chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise.

#### **I.8.1.1. Prise**

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important, est lié à de nombreux paramètres:

- le type du ciment, certains d'entre eux ayant des temps de prise beaucoup plus courts que d'autres dans les mêmes conditions d'ambiance.
- la finesse de mouture, le début de prise étant d'autant plus rapide que la finesse de mouture est grande.
- la température ambiante, la prise étant stoppée à 0 °C, alors qu'elle est très accélérée dès que la température dépasse 30°C ;
- la présence de matières organiques dans l'eau ;
- l'excès d'eau de gâchage qui agit alors comme retardateur. La norme spécifique, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :
  - 1 h 30 pour les ciments des classes 32,5 et 32,5 R ;
  - 1 h pour les ciments des classes 42,5 - 42,5 R - 52,5 - 52,5 R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 min à 3 h 30 min pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant pour une température ambiante de 20 °C.

#### **I.8.1.2 Durcissement**

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter

#### **I.8.1.3 Fausse prise**

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau :  $\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$ ). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre [ $\text{SO}_4\text{Ca}, 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ] dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse

#### **I.8.1.4 Chaleur d'hydratation**

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé finement, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature des constituants: les ciments CPA comportent presque exclusivement du clinker et dégagent plus de chaleur que les ciments avec constituants secondaires.
- La nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) et silicate tricalcique ( $C_3S$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- La température extérieure.

#### **I.8.1.5 Retrait**

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4x4 cm<sup>2</sup>, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

#### **I.8.1.6 Gonflement**

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler que bien qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, ses variations dimensionnelles étant environ le 1/10<sup>e</sup> de celle constatées dans l'air.

#### **I.8.1.7 Expansion**

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium que peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

#### **I.8.1.8 Finesse de mouture** (surface spécifique de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm<sup>2</sup> /g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm<sup>2</sup> /g. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important.

### **I.8.2 Caractéristiques mécaniques**

#### **I.8.2.1 Résistance mécanique**

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm (figure). La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

**I.9 DOMAINE D'UTILISATION DE DEFERENT CIMENT :**

**Tableau I.6:** Domaine d'utilisation de déferent ciment

<i>Ciment</i>	<i>Désignation</i>	<i>Utilisation</i>	<i>Contre-indication</i>
<b>Ciment Portland</b>  <b>Ciment composé</b>	CEMI CEMII	Tous travaux de béton armé ✓ Bonne résistance ✓ Décoffrage Rapide (préfabrication) ✓ Bétonnage par temps froid	✓ Présence d'eaux agressis ✓ Travaux souterrains ✓ Bétonnage engrande masse
<b>Ciment au laitier Et Pouzzolanique Ou au laitier et cendre.</b>	CEM III CEM IV CEM V	✓ Béton de masse (barrage) ✓ Béton de fondation (solagressif) ✓ Bétonnage en temps chaud ✓ Eau usée ✓ Travaux souterrains ✓ Réservoir d'eau	✓ Bétonnage partemps froid ✓ Béton préfabriqué ✓ Résistance à jeuneâge élevée



## CHAPITRE II

### LA FINESSE DE PRODUIT FINIS



La connaissance n'est complète qu'avec de bonnes mœurs

De nombreux facteurs affectent sur le temps de prise et le durcissement de mortier, mais au cours de cette étude nous discuterons de l'effet de la finesse sur les propriétés de ciment, et dans ce chapitre nous discuterons les caractéristiques du broyage du ciment et aborderons le concept de finesse.

## **II.1 LE BROYAGE DU CIMENT**

### **II.1.1 Définition :**

Le broyage consiste à réduire par écrasement des matières premières en poudre. Il constitue l'étape majeure du processus de fabrication du ciment, puisque le ciment n'est obtenu qu'à la fin de cette phase [12] à un rôle prépondérant car il permet de conférer au ciment fabriqué ses propriétés physico-chimiques telles que son temps de prise, son durcissement et sa résistance mécanique au jeune âge [9] Il est essentiel que l'échantillon à analyser soit homogénéisé de la meilleure manière possible et pulvérisé à un degré de finesse spécifique. [13]

### **II.1.2 TYPE DE BROEUR :**

L'industrie de production du ciment utilise deux types de broyeurs:

- le broyeur à boulet
- le broyeur vertical à galet

#### **II.1.2.1 Broyeur à Boulets.**

Un broyeur à boulets est constitué d'un cylindre métallique à axe horizontal dont le diamètre peut atteindre 5 m et 15 m de longueur et rempli en partie des boulets en acier. Il comporte des fonds plats ou coniques d'entrée ou de sortie de matière. Au moment de la rotation, les boulets sont soumis à leur poids et à la force centrifuge.

Dans certains procédés, la vitesse critique de rotation (la vitesse à laquelle la force centrifuge est égale au poids du boulet) peut être dépassée. La vitesse de rotation du broyeur s'écrit:  $N = 42,3 / D^{0.5}$  [tr/min], où D est le diamètre du broyeur Nous déduisons donc la vitesse de rotation critique formulée comme suite :  $W_{cr} = 2\pi N$ . L'efficacité maximale de broyage est atteinte pour une vitesse de rotation du broyeur de l'ordre de 75% de la vitesse critique.[12]

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs

à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.[15]

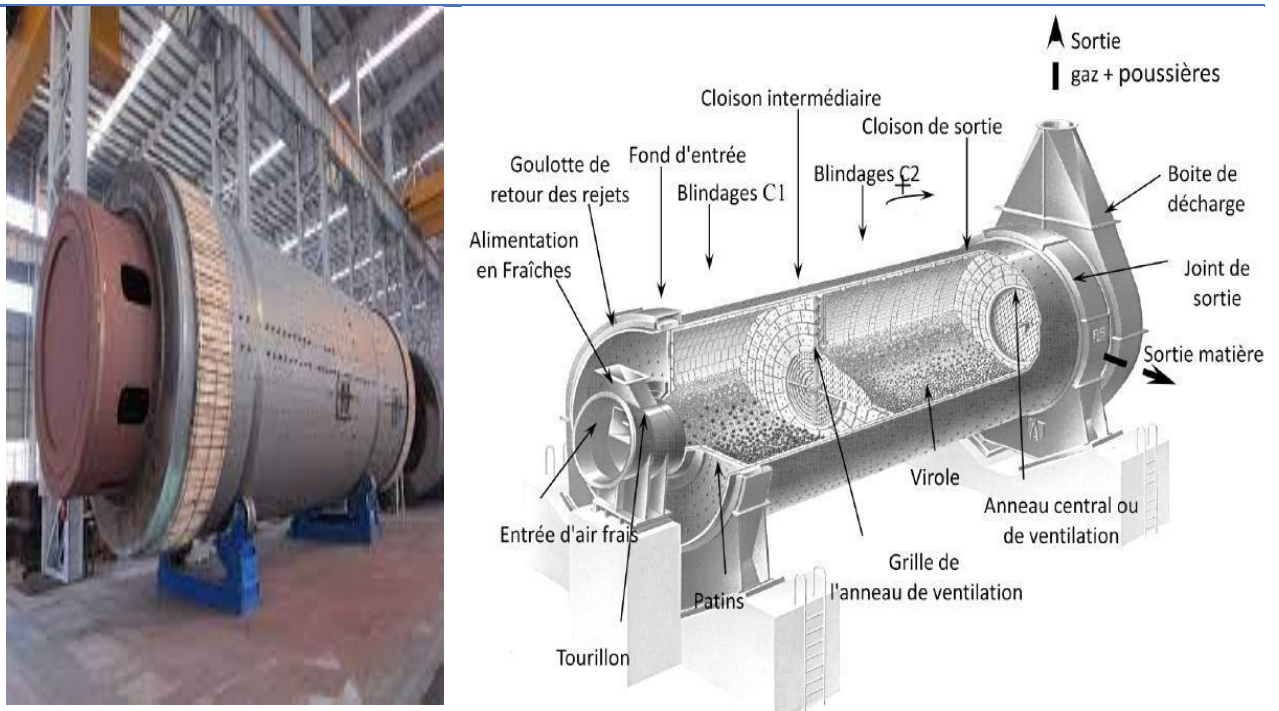


Figure II.1: Broyeur à boulet

➤ C'est quoi Les corps broyant ?

Les corps broyant sont des pièces métalliques sphériques (boulets) introduites dans le broyeur pour assurer la fragmentation de la matière par interaction entre les forces et les effets produits par le mouvement avec le matériau.[12]



Figure II.2 : Corps broyant (les boulets )

**II.1.2.2 Broyeur à galets:**

**II.1.2.2.1 Principe de broyeur vertical à galets**

Trois galets de broyage stationnaires roulent sur une assiette de broyage en rotation. La matière à broyer est saisie entre les galets de broyage et la piste et est broyée par les forces de pression et de cisaillement. Les forces de pression nécessaires au broyage sont produites par un système de tension hydropneumatique. En raison de la rotation de l'assiette de broyage, la matière broyée est rejetée vers l'anneau à tuyères stationnaire. Les gaz entrant par l'anneau à tuyères, soit de l'air ou des gaz chauds, emportent la matière broyée et séchée vers le sélecteur où elle est séparée, par le rotor, en refus et fines. Les refus sont retournés dans le centre de la zone de broyage. Les fines sont évacuées du sélecteur par le flux gazeux et séparées de l'air dans des cyclones ou un filtre [14]

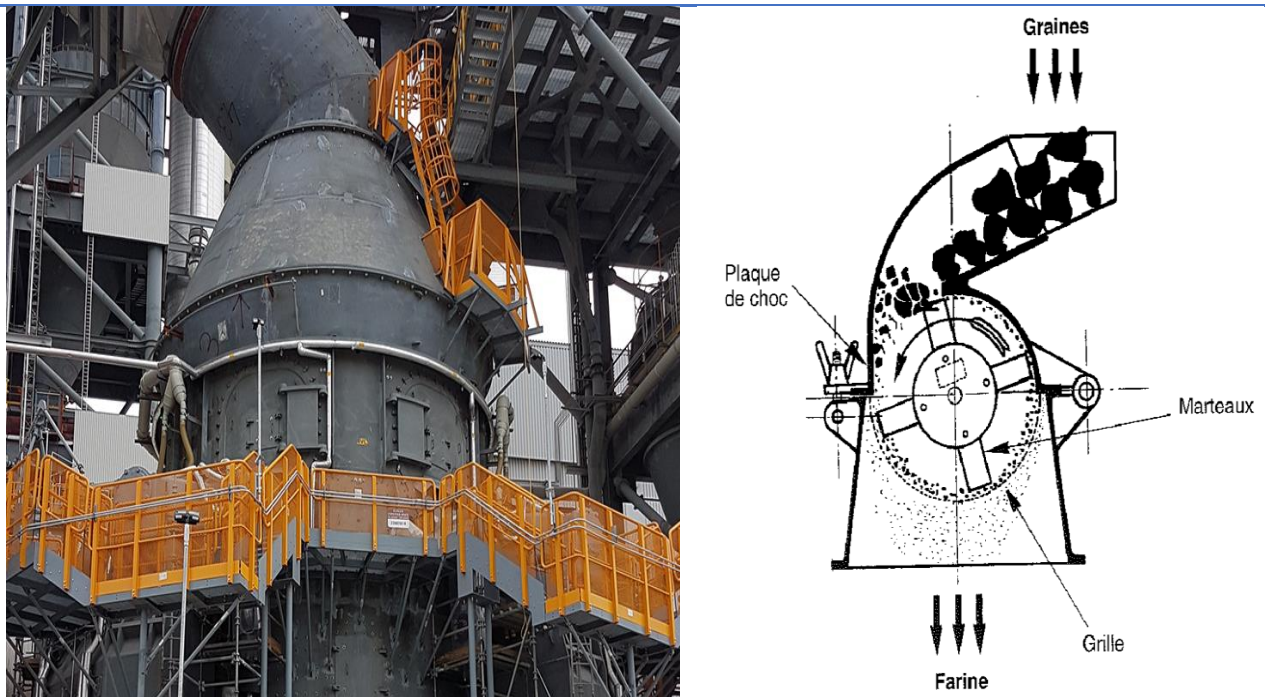


Figure II.3 : Broyeur vertical à galets

**II.1.2.2.2 Les paramètres influent sur l'efficacité du broyage :**

Les paramètres de broyage qui influent le plus sur l'efficacité du broyage sont :

- La vitesse de broyage.
- Le temps de broyage.
- Le ratio masse billes /Masse poudre. [16]

## II.2 LA FINESSE

### II.2.1 Définition

La finesse de la farine de ciment est une des conditions essentielles de la qualité de ce produit. L'expérience et les essais prouvent en effet, qu'indépendamment de la force adhésive et du rendement, toute une série d'autres propriétés du ciment sont en relation déterminée avec la finesse de la mouture. [9]

### II.2.2 Comment mesurer la finesse ?

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la finesse :

- La Surface Spécifique Blaine
- La composition granulométrique par tamisage manuel
- La composition granulométrique par tamisage mécanique à l'Alpine
- La composition granulométrique par laser

La SSB n'est qu'une approche globale de la finesse, par contre la granulométrie laser nous permet de connaître la composition granulométrique. A finesse SSB égale, il est possible d'avoir des courbes granulométrique totalement différentes.[9]

### II.2.3 La relation entre la finesse et la résistance

D'une manière générale les résistances augmentent avec la finesse :

- La tranche granulométrique d'environ 10um donne les R à court termes (1 à 2 jours)
- La tranche granulométrique d'environ 20um donne les R à moyen termes (7 jours)
- La tranche granulométrique d'environ 40um donne les R à long termes (28 jours)

## II.3 HYDRATATION DE CIMENT [4]

L'hydratation du ciment s'opère par dissolution des solides anhydres, suivie d'une précipitation des hydrates formant une structure mécaniquement résistante (théorie de Le Chatelier). Elle passe par une succession d'étapes clairement mises en évidence par calorimétrie.

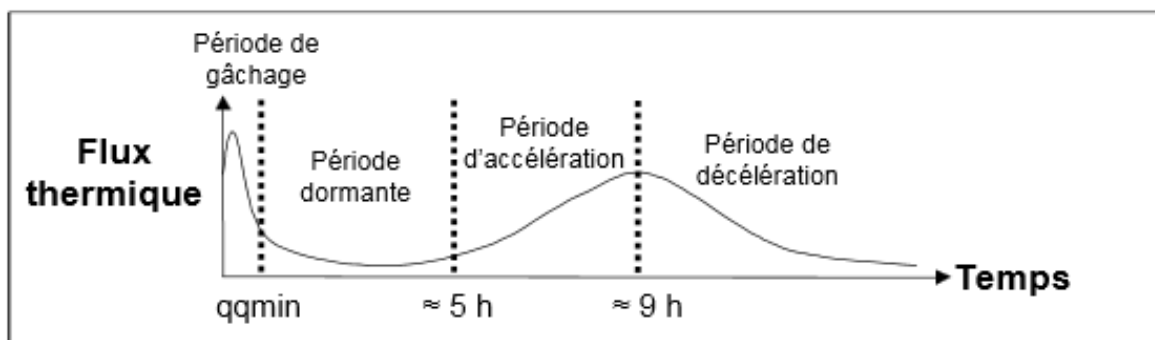


Figure II-4 : Flux thermique dégage par une pâte de ciment Portland en cours d'hydratation

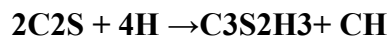
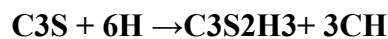


1. La phase de « pré-induction », durant quelques minutes, correspondant au mouillage des grains.
2. La phase d'induction, ou période dormante, dont la durée, le plus souvent de quelques heures, dépend du nombre de germes d'hydrosilicates (C-S-H) formés dès la mise en contact du ciment avec la solution de gâchage.
3. La phase d'accélération coïncidant approximativement avec le début de la prise et contrôlée par la croissance des hydrates sur les grains de ciment.
4. La phase de décélération due à la coalescence des îlots d'hydrates en croissance à la surface des grains, puis au recouvrement total des grains par les hydrates, les réactions étant alors limitées par la diffusion à travers ces couches d'hydrates.

Les réactions chimiques qui se produisent lors de la mise en contact du ciment avec l'eau peuvent être décrites de la façon suivante :

### II-3-1 Hydratation des silicates C3S et C2S

Elle produit des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (CH) selon les réactions bilans suivantes :



L'hydratation du C3S a une importance particulière parce qu'il est le composant prépondérant de plus, son produit d'hydratation (C-S-H) est responsable de la plus grande partie des propriétés mécaniques de la pâte durcie.

Le C3S confère rapidement au ciment une résistance élevée, son hydratation n'évolue pratiquement plus après 28 jours. Le C2S dont la cinétique est plus lente, permet au contraire d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme.

### II.3.2 Hydratation d'aluminate C3A

Le C3A est le constituant le plus réactif du clinker. Il réagit très rapidement avec l'eau pour donner des hydrates métastables (C4AH13, C2AH8) qui se transforment en un aluminate de calcium hydraté C3AH6. L'aluminate tricalcique contribue à la prise de la pâte de ciment, mais assez peu à la résistance finale. L'addition de gypse permet d'éviter le phénomène de fausse prise due à la cristallisation quasi immédiate des aluminates hydratés qui entraîne une mauvaise ouvrabilité de la pâte. Cet ajout de gypse provoque en effet la formation autour des grains de C3A d'ettringite (tri sulfo aluminate de calcium hydraté).



La formation d’ettringite consomme 3 moles de sulfate de calcium par mole d’aluminat tricalcique. La teneur en gypse des ciments étant limitée, il y a donc en général excès de C3A par rapport au gypse. Lorsque le gypse est totalement consommé, la solution devient sous saturée par rapport à l’ettringite. Celle-ci se dissout et devient la nouvelle source de sulfate pour former avec l’aluminat excédentaire un nouveau composé : le monosulfoaluminat de calcium hydraté, avec une mole de sulfate de calcium pour une mole de C3A.



**II.3.3 Hydratation du C4AF**

Est semblable à celle du C3A, mais la vitesse de réaction est plus lente et les hydrates formés contiennent du fer. Les produits de réactions sont les même que ceux issus du C3A en substituant aux aluminates des alumino-ferrites. Une pâte de ciment Portland hydraté contient approximativement 15 à 25 % (en masse) de portlandite, 60 à 70 % de C-S-H et 5 à 15% de phases aluminates. Les produits d’hydratation des différentes phases du clinker sont récapitulés dans le tableau II.1.

**Tableau II.1 : Produits d’hydratation du clinker**

<i>ANHYDRES</i>	<i>HYDRATES</i>
<b>C2S</b> <b>C3S</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C-S-H (silicates de calcium hydratés)</li> <li>• CH (la portlandite)</li> </ul>
<b>C3A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C3AH6</li> <li>• C4AH13</li> </ul> En présence de gypse : <ul style="list-style-type: none"> <li>• C3A.3CaSO4.32H2O (ettringite)</li> <li>• C3A.CaSO4.12H2O (monosulfoaluminat de calcium hydraté)</li> </ul>
<b>C4AF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C3 (A, F) H6</li> <li>• C4 (A, F) H13</li> </ul> En présence de gypse : <ul style="list-style-type: none"> <li>• C3(A,F).3CaSO4.32H2O</li> </ul>

**II.3.4 La relation entre la finesse et l’hydratation de ciment**

La finesse est l'une des principales propriétés physiques du ciment affectant le taux d'hydratation. C'est la surface totale du ciment qui représente la matière disponible pour l'hydratation. Ainsi, le taux d'hydratation dépend de la finesse des particules de ciment et pour un développement rapide de la résistance, une grande finesse est nécessaire ; la résistance à long terme n'est pas affectée. Un taux d'hydratation précoce plus élevé signifie, bien sûr, également un taux plus élevé d'évolution précoce de la chaleur. Une plus grande finesse augmente la surface disponible pour

l'hydratation, ce qui entraîne une plus grande résistance initiale et une génération de chaleur plus rapide. Une augmentation de la finesse augmente la quantité de gypse nécessaire pour un bon retardement, car dans un ciment plus fin, plus de C3A est disponible pour une hydratation précoce. La teneur en eau d'une pâte de consistance standard est d'autant plus grande que le ciment est plus fin, mais à l'inverse une augmentation de la finesse du ciment améliore légèrement la maniabilité d'un mélange de béton. Un meulage plus élevé conduit à un béton plus résistant. Mais la consommation d'énergie est un facteur déterminant. Ainsi, la finesse est une propriété vitale du ciment et doit être soigneusement contrôlée.[17]

## **II.4 LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DE CIMENT**

Le ciment est un matériau utilisé pour réaliser des travaux de gros œuvre. Il permet notamment de créer du béton après sa prise et son durcissement. Se présentant sous forme de poudre, le ciment est mélangé à l'eau et va progressivement se durcir pour créer un matériau solide. Ainsi, le ciment subira deux phases principales avant de devenir du béton : **la prise et le durcissement**. [18]

**II.4.1 La prise :** La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide (plastique) à l'état solide (rigidification). Le temps de prise se mesure sur une pâte de consistance normalisée à l'aide de l'aiguille de Vicat (NF EN 196-3) [19]

- **Le début de prise** correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température.
- **La fin de prise** correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début du durcissement

**II.4.2 La durcissement :** Le durcissement final du ciment en béton est généralement observé au bout de 28 jours. Cependant, certains facteurs peuvent influencer sur la vitesse de durcissement comme :

- la qualité du béton.
- le type de ciment.
- le dosage en ciment dans la création du béton.
- la quantité d'eau ajoutée au ciment.



- la température ambiante et les conditions climatiques. [18]

### II.4.3 Les paramètres influençant sur le temps de prise [9]

Ils sont de nature:

- **Physique** : finesse, demande en eau, température, éventement.
- **Chimique** : C3S, C3A, CaO libre, sulfates, éléments mineurs, adjuvants ...

Leur impact sur la prise est variable selon les ciments par interaction avec les autres paramètres qu'ils soient physiques ou chimiques.

Pour un même ciment, une augmentation de la finesse de mouture entraîne une accélération des réactions d'hydratation d'où :

- Une prise plus rapide
- des résistances plus élevées dans les 28 premiers jours
- une chaleur d'hydratation plus élevées dans les premiers jours.

#### II.4.3.1 Paramètres physique :

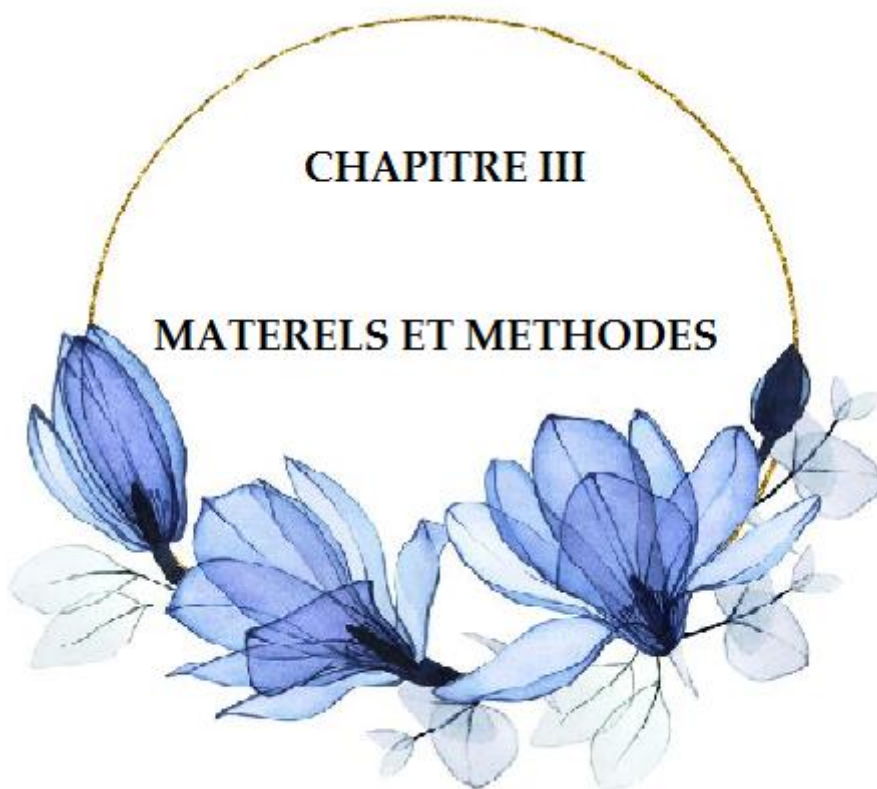
- Finesse Blaine: 20 à 25 min pour 100m<sup>2</sup>/kg ( minimum 15 , maximum 50 min )
- Eau de gachage: 10 à 20 min pour 1% d'eau de gachage
- Température : ficée pour la norme , elle n'intervient qu'à l'utilisation où elle accélère les reactions , ainsi un début de prise en pate pure de 240 min à 20 C° passe à 100 min à 40 C° et à 420 min à 5C°.
- Eventement (consistance): il s'accompagne en générale d'une augmentation de la demande en eau ( jusqu'à 0.1%) et d'un allongement de temps de prise.

#### II.4.3.2 Paramètres chimique :

- Composants de clinker et sulfates: les silicates, aluminates, alcalins et sulfates (y compris ajoutés au broyage) ne présentent pas d'action marquée sur la prise
- CaO libre : 1% de CaO libre raccourcit le temps de prise de 60 min en moyenne cette action varie de 15 à 120 min, selon les clinkers et la nature de la chaux (plus ou moins rapidement soluble selon cuisson, répartition, vive ou éteinte ...etc.)
- Éléments mineurs : certains éléments sont retardateurs ou accélérateurs à raison de 1heure pour quelques dixièmes de % .ces éléments peuvent être apportés :
  - Par les matières premières ou les combustibles (naturels ou secondaires)
  - Par certains sulfates de calcium de récupération
  - Par certain adjuvants destinés à jouer sur la prise

## CHAPITRE III

### MATERELS ET METHODES



*L'homme est poussé par le besoin de savoir. »*

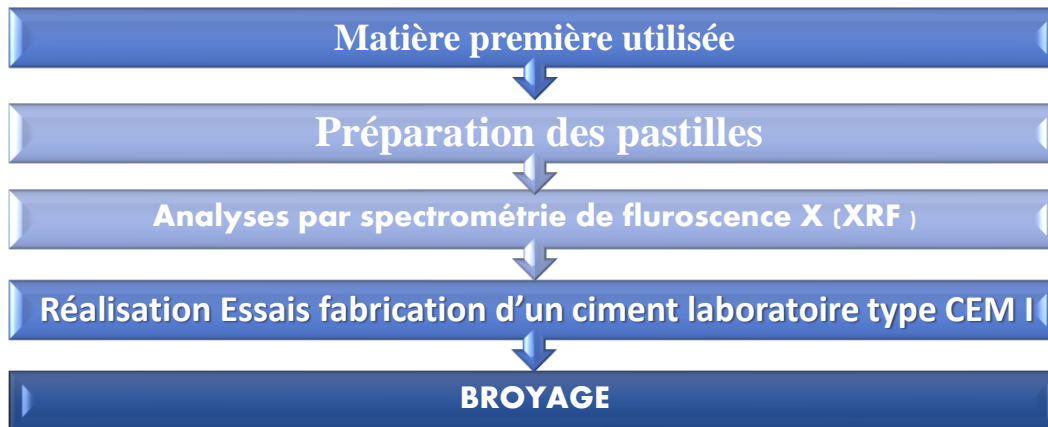
*Robert OPPENHEIMER*

Dans cette partie, qui portera sur l'étude de l'effet de la finesse sur les propriétés physique (par mesure de la : surface spécifique de Blaine, Refus, consistance, temps de prise) et sur les propriétés mécanique par mesure de la résistance normale sur la pâte de mortier (ciment-sable-eau) et la granulométrie laser (PSD), et même les propriétés chimique en réalisant des analyses XRF, PAF, Chlore, FCaO.

Les différents essais sont réalisés conformément aux normes en vigueur, dont le choix et la nature est fonction de caractéristiques ciblées en objectifs ainsi qu'à la disponibilité de l'appareillage et les équipements nécessaires.

### III.1 PREPARATION D'ECHANTILLONS

Le programme expérimental pour la préparation des échantillons se subdivise comme montré l'organigramme ci-dessous :



#### III.1.1 MATIERE PREMIERE

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont le clinker qui est préparés essentiellement de l'argile et du calcaire surabondants dans la nature et le gypse.

##### III.1.1.1 Clinker:

###### III.1.1.1.1 Définition

Le clinker Portland est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par calcination (1450 °C) d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80 % de calcaire et 20 % d'argile, (farine crue, ou pâte) contenant des éléments couramment exprimés en oxydes Ca O, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de petites quantités d'autres matières. La farine crue ou la pâte, sont finement divisées et intimement mélangées, et donc homogène. Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de

calcium ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  : C3S et  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ : C2S), la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer: C3A et C4AF, et de chaux libre (CaO) ne dépassant pas 2%. Le rapport massique (CaO)/(SiO<sub>2</sub>) ne doit pas être inférieur à 2,0. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse. [19]



**Figure III.1: CLINKER**

### **III.1.1.2 Gypse**

#### **III.1.1.2.1 Définition**

Le gypse est la matière première utilisée pour la fabrication du ciment, est constitué en couches épaisses et se trouve aujourd'hui enterrée sous terre.

#### **III.1.1.2.2 Rôle de GYPSE**

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique grâce a ce gypse la prise du ciment [15]



**Figure III.2 : GYPSE**

### III.1.2 PRÉPARATION DES PASTILLES :

#### III.1.2.1 Matériel utilisé

- Balance
- Concasseur
- Broyeur à disque
- Diviseur
- Presse hydraulique
- Anneau en acier



Figure III.3 Presse hydraulique

Figure III.4 Broyeur à disque

#### III.1.2.2 Mode opératoire

##### III.1.2.2.1 Pastille de Clinker

- Préparer une quantité de clinker, la casser avec un concasseur, puis utiliser un diviseur pour homogénéiser
- Peser ensuite 20 g de clinker à l'aide d'une balance, mettre la quantité pesée dans le broyeur à disque pendant 130 s, puis peser 1 g de cire et l'ajouter au clinker dans le broyeur pendant 20 s.
- Après avoir obtenu ce mélange homogène (clinker –Wax), peser 10 g et le mettre dans la pastille, puis mettre elle dans une presse hydraulique sous une pression de 400 KN, et avec cela nous aurons une pastille prête pour l'analyse chimique par XRF

**III.1.2.2.2 Pastille de GYPSE**

- Tout d'abord, prendre une quantité de gypse et le sécher pendant 15 minutes en utilisant ETUVE ELECTROTHERMAL Blast (séchage-humidité)
- on prépare une quantité de gypse, on la casse au broyeur, puis on utilise un déviseur pour homogénéiser
- On pèse 20 g de gypse à l'aide d'une balance électronique, puis on met la quantité pesée dans le bol du broyeur, on laisse broier pendant 90 s, d'autre part on pèse 0.5 g de wax, puis l'ajout au bol de broyeur 90 s écoulées, Nous les broyons ensemble (Gypse -wax) pendant 20 s
- Après avoir obtenu ce mélange homogène (Gypse –Wax), peser 10 g et le mettre dans la pastille, puis dans une presse sous une pression de 200KN, et avec cela nous aurons une pastille prête pour l'analyse chimique par XRF

**Figure III.5** Pastille de clinker**Figure III.6** Pastille de Gypse**III.1.3 ANALYSE PAR SPECTROMETRIE DE FLUORESCENCE X (XRF)****III.1.3.1 Définition**

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide [4]



**III.1.3.2 But**

L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature de l'élément chimique présent dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.[8]

**III.1.3.3 Mode opératoire**

Lorsqu'un échantillon est bombardé par un rayonnement primaire émis par une source d'excitation énergétique, un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés de leurs orbitales atomiques (ou couches électroniques). Ainsi, un électron d'une couche électronique supérieure vient remplacer l'électron éjecté et libère à son tour de l'énergie sous forme de rayons X. Ce rayonnement secondaire constitue le phénomène de « Fluorescence ». Chaque élément chimique est caractérisé par un spectre de fluorescence X spécifique.

L'analyse de ce spectre permet d'identifier les éléments présents dans un échantillon et de déterminer leurs concentrations.[4]



**Figure III.7 :** Appareil de fluorescence X.

La composition chimique moyenne du clinker et du Gypse utilisé dans cette mémoire est présentée dans les tableaux suivants :

**Tableau III.1:** Composition chimique du clinker de ciment Portland ordinaire (OPC) par XRF

CLINKER	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
% (en masse)	20.326	5.140	3.438	65.603	3.449	1.020	0.616	0.184	0.157



**Tableau III.2:** Composition chimique du GYPSE Par XRF

GYPSE	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>
% (en masse)	5.799	1.111	0.470	34.513	0.675	35.295	0.186	0.030	0.000	21.922

### III.1.4 ESSAIS DE FABRICATION D’UN CIMENT LABORATOIRE TYPE CEMI

#### III.1.4.1 Définition

Cette méthode est applicable sur du clinker ( préalablement concassé à 3.15 mm) et au gypse dans des proportions bien définis pour permettre la fabrication d’un ciment de laboratoire de type CEMI après le broyage sachant que la quantité obtenue peut varier de 1 kg à 20 kg selon le broyeur utilisé, dans cette étude un broyeur à boulets a été utilisé.

#### III.1.4.2 But

Pour effectuer des essais physique et mécanique et analyser la matière à l’échelle laboratoire

#### III.1.4.3.Mode opératoire

D’après Notre résultat d’analyse chimique par XRF, on peut calculer la composition de clinker -Gypse selon lala présence de SO<sub>3</sub> dans le Clinker et Gypse.

#### III.1.4.4 Rôle de SO<sub>3</sub>

La présence de SO<sub>3</sub> dans le clinker réduit le pourcentage de C3A et C3S ainsi que le rapport de C3S/C2S mais elle n'affecte pas le pourcentage de C4AF. L'anhydrite existe dans le clinker contenant plus que 1,5 % de SO<sub>3</sub> mais elle est totalement dissociée dans une période de 5 jours. Cette anhydrite participe dans le processus de début de prise du ciment.

Le ciment, produit à partir d'un clinker contenant un taux relativement élevé de soufre, a une meilleure résistance aux sulfates et un développement relativement lent de la résistance à la compression qu'un ciment classique ayant la même composition chimique.

Le pourcentage de SO<sub>3</sub> dans le ciment commercialisé est généralement inférieur à 3%, et s’il est supérieur à 3% le ciment se fissurera.

On à:

- $\text{SO}_3$  dans le Clinker = 1.014%
- $\text{SO}_3$  dans le Gypse = 35.643 %
- $\text{SO}_3$  visé = 3%

On peut calculer les compositions de Clinker et Gypse comme suite :

$$\mathbf{R1 = SO_{3Gypse} - SO_{3\text{ Visé}} \Rightarrow R1 = 35.643 - 3 = 32.643 \Rightarrow R1 = 32.643\%}$$

$$\mathbf{R2 = SO_{3\text{ Visé}} - SO_{3\text{ Clinker}} \Rightarrow R2 = 3 - 1.014 = 1.986 \Rightarrow R2 = 1.986\%}$$

$$\mathbf{R3 = R1 + R2 = 32.643 + 1.986 = 34.629 \Rightarrow R3 = 34.629}$$

Donc, Le pourcentage de Clinker dans le ciment est déterminé par:

$$\mathbf{R1 \rightarrow 100\%}$$

$$\mathbf{R3 \rightarrow \% \text{Clinker}}$$

$$\Rightarrow \% \text{Clinker} = \frac{32.643}{34.629} * 100 = 94.26\%$$

Et le pourcentage de Gypse :

$$\mathbf{R2 \rightarrow 100\%}$$

$$\mathbf{R3 \rightarrow GYPSE\%}$$

$$\Rightarrow \% \text{Gypse} = \frac{1.986}{34.629} * 100 = 5.73\%$$

Donc les quantités de Clinker et Gypse utilisées pour préparer notre échantillon (CEM 1) sont :

$$\text{Masse de Clinker} = \frac{94.26 * 5000}{100} = \mathbf{4713g}$$

$$\text{Masse de Gypse} = \frac{5.73 * 5000}{100} = \mathbf{286.5g}$$

### III.1.5 BROYAGE

#### III.1.5.1 Définition

La granulométrie d'un clinker dépend le type de broyeur, donc on à utilisé le broyeur a boulets dans ce projet.

#### III.1.5.2 Le broyeur à boulets

Appareil utilisé pour la transformation des matériaux en poudre fine (minerais, certain produit chimique dur, céramique ...), avec l'aide des billes de céramique et les billes en acier inoxydable et les pièces de silex pour obtient une poudre avec granulométrie s'échelonne de 1\_100 $\mu$ .

#### III.1.5.3 Mode opératoire

Pour notre premier échantillon dans un broyeur à boulets on a broyé l'échantillon pendant 30 min. Après nos 30 min, on a changé la porte 1 (porte fermée) avec la porte 2 (Porte avec vide) pour vider la matière pendant 10 min. Après avoir terminé le processus dans le broyeur à boulets, nous mettons l'échantillon au tamis de 90  $\mu$ m afin que l'échantillon soit prêt pour étudier.



**Figure III.8** Broyeur à boulets laboratoire



**Figure III.9** les échantillons obtenus après le broyage

## III.2 METHODE CHIMIQUE

### III.2.1 Détermination de la perte au feu à 950 C°

#### III.2.1.1 Définition

La perte au feu est le pourcentage de matière éliminée (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) au cours de la calcination à l'air d'un échantillon.

#### III.2.1.2 Mode opératoire

Pour calculer le pourcentage d'H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> dégagé pendant la calcination on passe par les étapes suivantes :

- Peser et noter la masse d'une capsule en platine vide  $m_1$
- Peser 1g et noter la masse de l'échantillon  $pe$ .
- Placer la capsule dans le four à  $975^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  et laisser calciner pendant 30 min
- Sortir la capsule du four et laisser refroidir quelques minutes dans un dessiccateur
- Peser et noter la masse de la capsule après perte au feu  $m_3$

$$\text{PAF} = \frac{m_1 + pe - m_3}{pe} * 100$$

PAF : Perte au feu

$m_1$  : masse de la capsule vide en g

$Pe$  : prise d'essai en g

$m_3$  : masse finale (capsule + matière calcinée)

**Remarque :** Les valeurs de pertes au feu arrondies à 0.05 %.



Figure III.10 : Les étapes de détermination de la PAF

### III.2.2 Détermination de la chaux libre

#### III.2.2.1 Définition

La teneur en chaux libre [non liée : CaO et Ca(OH)<sub>2</sub>] est une des caractéristiques les plus importantes de la chaux vive ou hydratée, elle exprime la quantité d'oxyde de calcium disponible pour réagir chimiquement, par opposition à la teneur en oxyde de calcium total qui, outre la teneur en oxyde et hydroxyde de calcium, tient compte des teneurs en carbonates, silicates, aluminates et ferrites exprimées en équivalent d'oxyde de calcium[24]. La teneur en chaux libre définit la qualité et le degré de cuisson de clinker, Le pourcentage de la chaux libre dans le ciment compris entre 0.6 et 2.8 % et si elle est élevée à 2.8%, il y a une dégradation de la qualité de cuisson de clinker et Résistance sera élevée.

#### III.2.2.2 Mode opératoire

- Pesez exactement 0.5g de l'échantillon dans un ERLLENMEYER avec 250 ml
- Ajouter 25ml de mélange (Ethylène glycol+Ethanol).
- Placer ERLLENMEYER sur le CALCIMETRE.
- Démarrer l'appareil de l'agitation au voltage 220V et attendre jusqu'à l'évaporation. Puis mettre l'appareil au voltage 100V et démarré le chronomètre du CALCINATEUR pendant 4 min (apparition de la couleur).
- Titrer avec solution acide benzoïque jusqu'à changement de la couleur (vers la couleur grise).[23]
- $FCaO\% = \text{Volume acide benzoïque} * \text{Facteur}$ , avec le Facteur égale à 0.6266



Figure III.11: CALCIMETRE

### III.2.3 Détermination de Chlore

#### III.2.3.1 Définition

Le pourcentage de chlorure contenu dans le ciment ne dépasse pas la valeur 0.1%, dans le cas où le pourcentage de chlore est supérieur à 0.1 %, le ciment sera gonflé et la résistance est augmentée [23].

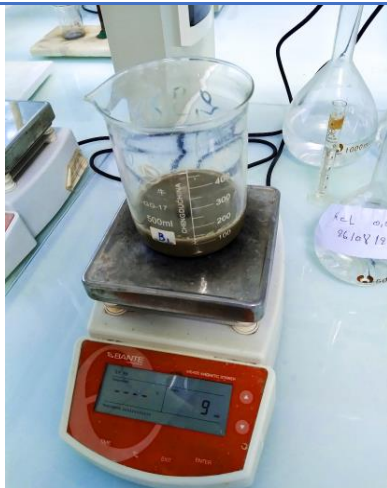
#### III.2.3.2 Principe

Solubilisation des chlorures, précipitation des chlorures au moyen du nitrate d'argent. Suivi du titrage par potentiomètre au moyen d'une électrode d'argent en présence d'une solution observe une brusque variation de potentiel quand du nitrate d'argent est ajouté en excès [23].

#### III.2.3.3 Mode opératoire

Le pourcentage du Cl dans l'échantillon est déterminé selon le protocole expérimental suivant :

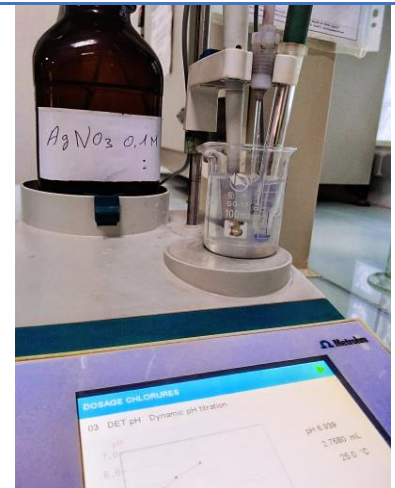
- Peser 8g de l'échantillon et mélangé avec 100ml d'eau distillé dans un bécher.
- Agiter le mélange par un agitateur magnétique pendant 10min.
- Filtrer la solution travers un papier filtre dans un ERLLENMEYER.
- Ajouter 5 ml de l'acide nitrique  $\text{NH}_3$  concentré à 80ml de solution filtré et agiter pendant 1 à 2 min.
- Faire le titrage de la solution par  $\text{AgNO}_3$  (0.1M).
- L'appareil donne automatiquement le pourcentage de chlore contenu dans le ciment.



Agitation



Filtration



Potentiométrique



### III.3 METHODE PHYSIQUE

#### III.3.1 Refus

##### III.3.1.1 Définition

Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus de ciment après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage [4].

##### III.3.1.2 But

- Pour calculer le pourcentage des refus de ciment utilisé après le broyage
- Pour connaître le degré de broyage.

##### III.3.1.3 Mode opératoire

1. Peser 10 g de l'échantillon et vider dans le tamis de 45 $\mu$ m.
2. Tamiser à l'aide d'une tamiseuse alpine sous pression 2600Pa pendant 2 min.
3. Peser les résidus obtenus dans le tamis, qui représente le pourcentage de refus.

**Remarque:** Même étapes pour un tamis de 90 $\mu$ m.



**Figure III.12:** Tamis de 45  $\mu$ m et 90  $\mu$ m



**Figure III.13:** Appareil Alpine

### III.3.2 Surface spécifique de Blaine SSB :

#### III.3.2.1 Définition

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm<sup>2</sup>/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000m<sup>2</sup>/g. [15]

#### III.3.2.2 But

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm<sup>2</sup> de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface et a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre [15].

#### III.3.2.3 Mode opératoire

1. Peser 2.91g de l'échantillon.
2. Placer un papier filtre neuf au fond la cellule et à l'aide de l'entonnoir vider 2.91g à l'intérieur de cellule, bouge le un peu pour créer une surface uniforme pour le ciment.
3. Placer un autre papier filtre neuf.
4. À l'aide d'un piston, essayer de faire descendre doucement le papier-filtre dans la cellule pour éviter que le ciment ne sorte des bords et retirer également doucement.
5. Préparer l'appareil par voir le niveau de liquide dans le manomètre qui doit s'écouler avec la ligne de bas.
6. Vérifier les données du ciment : Densité 3.15 pour un CEMI 42.5RNLH/SR3.
7. Placer la cellule à sa place dans l'Appareil Perméabilimètre de Blaine
8. appuyer sur le bouton de SURFACE puis START.

La surface spécifique calculée par la formule suivante.

$$S = K \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1 - e)\sqrt{\mu}}$$

Avec :

S : surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g).

K : constante de l'appareil.

e : porosité de la couche tassée (0.5).

$\rho$  : Masse volumique des grains.

$\mu$  : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises)



Figure III.14: Appareil Perméabilimètre de Blaine

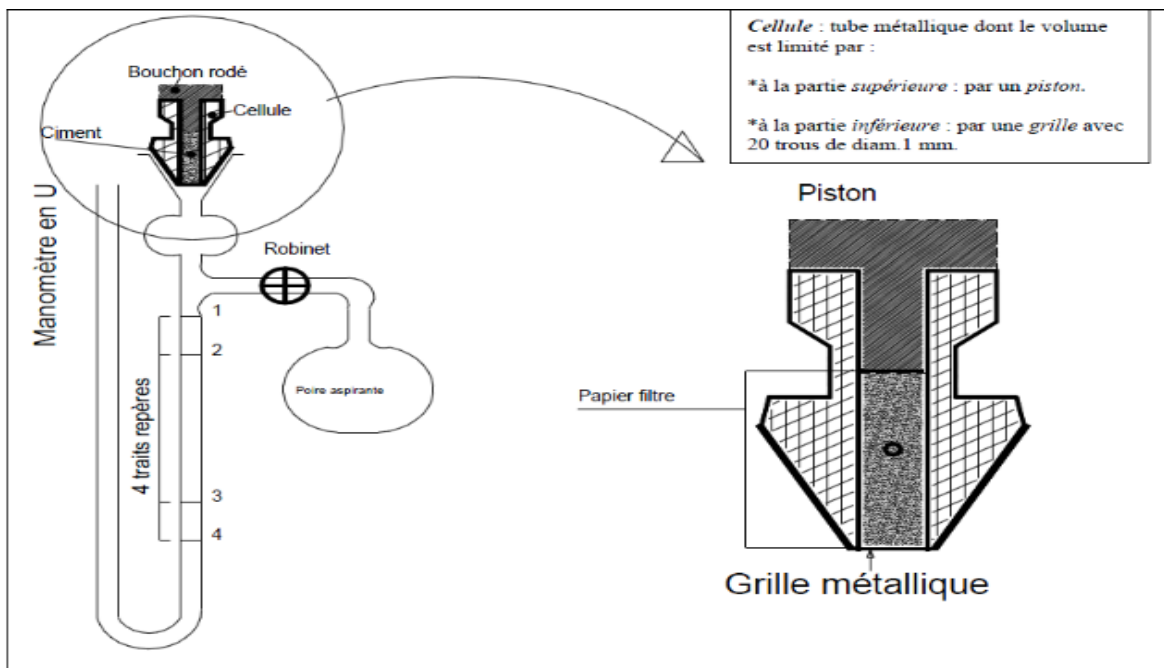


Figure III.15 Principe de fonctionnement du PERMIABILIMETRE de Blaine

**III.3.3 La consistance normale****III.3.3.1 Définition**

La consistance normale caractérise les propriétés Rhéologique des pâtes. Elle consiste à la détermination de la valeur rationnelle E/C (eau/ciment).

**III.3.3.2. La Pâte normale**

Est une pâte de consistance normale ; c'est-à-dire tel qu'en opérant avec l'appareil de Vicat, la lecture donnant l'épaisseur de la pâte restante entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule quand celle – ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids est de  $6 \text{ mm} \pm 1$  [4]

La quantité d'eau nécessaire pour la pate, elle varie de 24 à 28% (rapporté à la masse de ciment)

Cette quantité d'eau dépend de plusieurs facteurs :

- La composition minéralogique
- La finesse de mouture
- La présence d'additions.

**III.3.3.3 Matériels utilisé :** L'essai doit se dérouler dans une salle selon les normes suivantes :

- la température est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- l'humidité relative est supérieure à 90%.



**Balance + 500g d'échantillon**



**Malaxeur**



Moule tronconique rempli de la pâte



Eprouvette graduée

### III.3.3.4 Mode opératoire:

1. Préparer 500 g de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,24 (120ml /500g) (rapport de départ).
2. Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment.
3. Mettre le malaxeur en marche et le faire tourner à vitesse lente pendant 60 secondes.
4. Au bout de ces 60 s, arrêter le malaxeur pendant lesquelles tout la pâte adhérant à la cuve de la zone de malaxage doit grattée et remise dans la gâchée.
5. Mettre alors la machine en route à vitesse rapide pendant 90 s.
6. La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.
7. la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse, alors elle s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base
8. la pâte sera à consistance normale si  $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ :  
 si  $d > 7\text{ mm}$  : il n'y a pas assez d'eau.  
 si  $d < 5\text{ mm}$  : il y a trop d'eau. [20]

**Remarque :** Reprendre les essais avec d'autres quantités d'eau sur les autres échantillons, si les valeurs ne sont pas réalisées.

**Calcul :** soit V (ml) le volume d'eau utilisé pour obtenir la pâte de consistance normalisée (6mm ± 1mm) le pourcentage d'eau est calculé par la formule suivante :  $\%H_2O = 0.2 * V$

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente

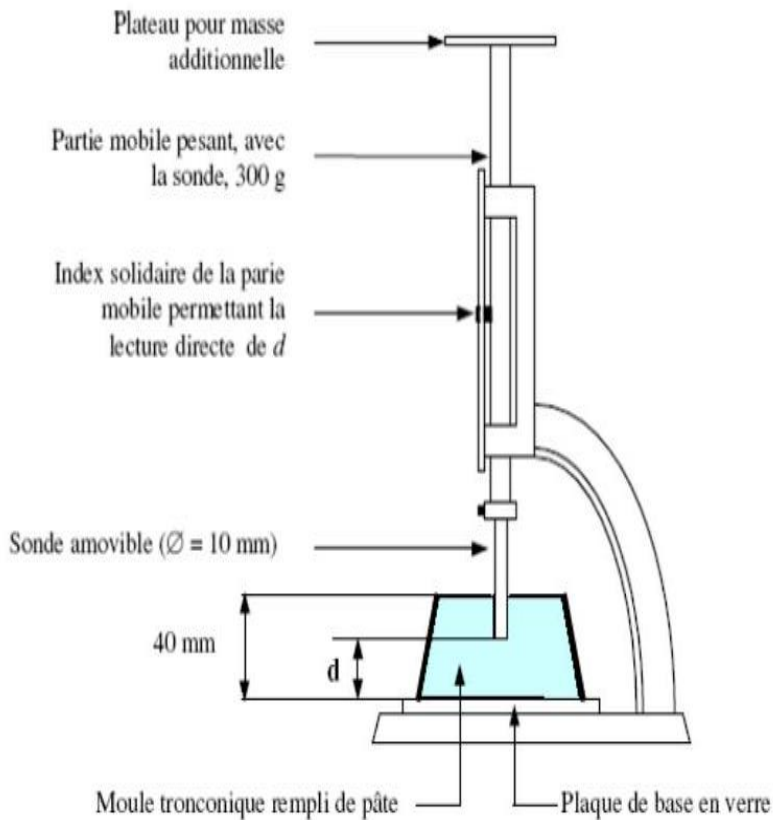
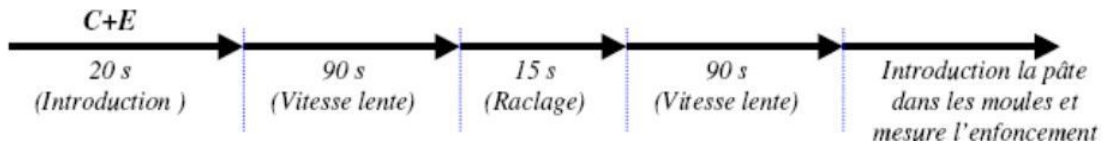


Figure III.16 Appareille de VICAT muni de la sonde de consistance



### III.3.4 Essais de prise

#### III.3.4.1 Définition

La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide (plastique) à l'état solide (rigidification). Le temps de prise se mesure sur une pâte de consistance normalisée à l'aide de l'aiguille de Vicat (NF EN 196-3). [19]



La prise du ciment est composée de deux phases :

- **la phase dormante** : le béton est frais et conserve sa maniabilité ;
- **le début et la fin de prise** : les réactions chimiques d'hydratation s'accroissent pour donner naissance à des microcristaux d'hydrates qui commencent alors à relier les grains de ciment entre eux.

Le début de la prise du ciment s'effectue généralement au bout de 2 heures. La fin de la prise est constatée lorsque la pâte n'est plus déformable et qu'elle devient alors un matériau rigide. Les grains de ciment sont alors tous solidarisés [21].

#### III.3.4.2 Matériels utilisés

- Appareil de Vicat.
- Malaxeur démontable.
- Balance électronique.
- Ciment.

#### III.3.4.3 Mode opératoire

- Une fois la pâte à consistance normale obtenue, on procède au changement de la sonde de Vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse).

- L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base
- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (10-15 mn) jusqu'à ce que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$ .

Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé [20].

- le temps de début de prise correspond à la lecture de  $4 \pm 1\text{mm}$  noté à partir du temps zéro
- le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0.5 mm noté à partie du temps zéro.

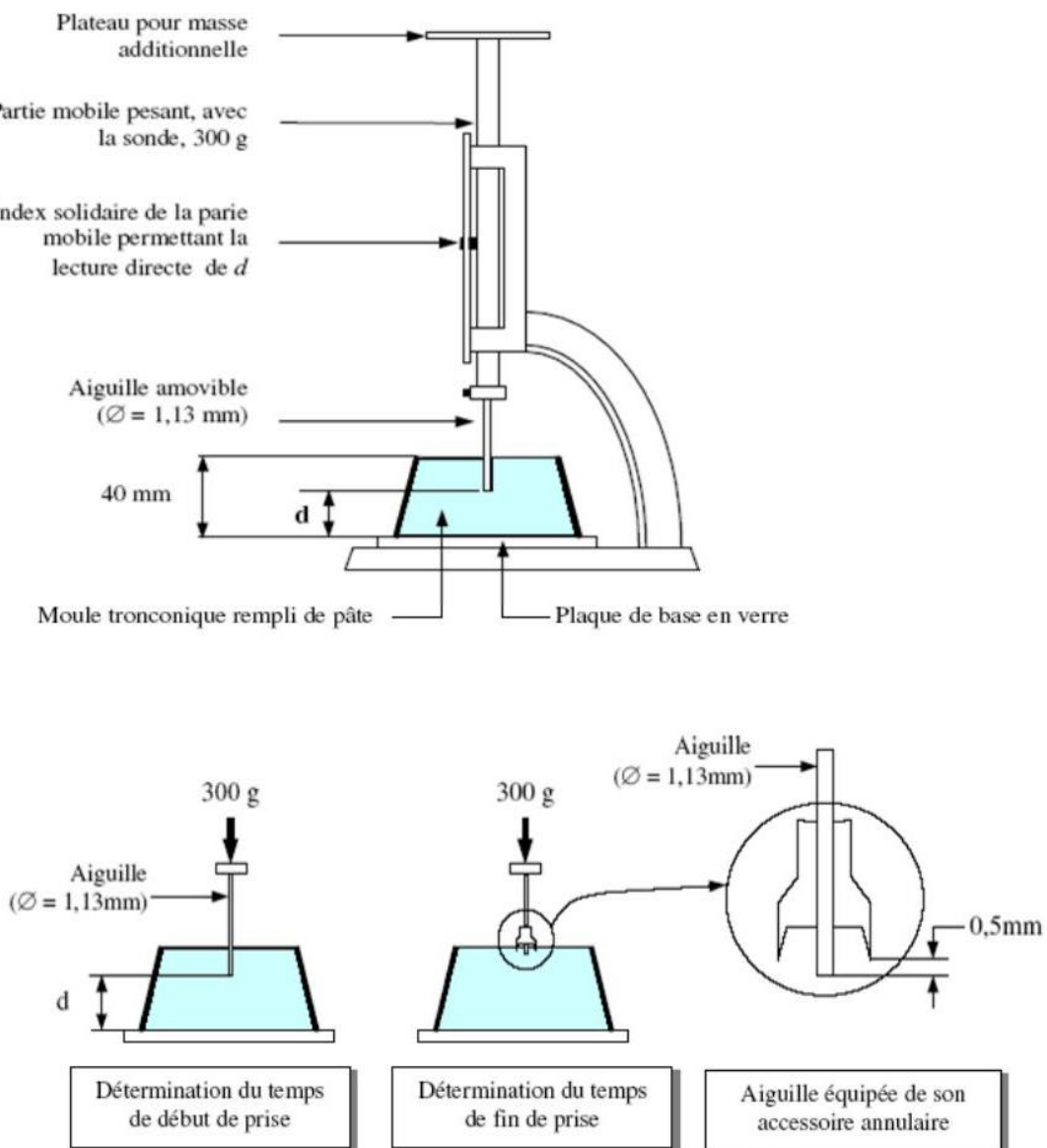


Figure III.17: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible

## III.4 METHODE MECANIQUE

### III.4.1 Granulométrie laser – PSD

**III.4.1.1 Définitions de la Granulométrie :** étude de la distribution de la taille des particules présentes au sein d'échantillons secs (poudres, farines, sables...) ou liquides (sirops, émulsions, suspensions...)

**Granulométrie à diffraction laser :** cette technique utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule.

**III.4.1.2 Principe :** Les particules passent à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multi-éléments. L'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés (théorie de Mie ou théorie de Fraunhofer). Le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent) [22].

### III.4.1.3 Mode opératoire :

Démarrage :

- Mettre l'appareil en position on 20 min avant l'utilisation.
- Mettre le compresseur d'air et l'aspirateur en position on

Essais :

- Ouvrir le capot de AERO.
- Placer environ 5g d'échantillon (ciment) dans AERO.
- Fermer le capot.
- lancer l'application MASTERSIZER E300.



Figure III.18 Granulométrie laser (MASTERSIZER E300)

### III.4.2 La Résistance (flexion –compression)

**III.4.2.1 Définition :** La classe de résistance d'un ciment est la valeur minimale de résistance à la compression (exprimée en MPa), mesurée sur éprouvettes 4x4x16cm, 28 jours après leur confection et conservées dans l'eau à 20°C. Il existe trois classes de résistance courante d'un ciment, 32,5 42,5 et 52,5 définies dans la norme NF EN 197-1. À chaque classe de résistance courante correspondent trois classes de résistance à court terme : une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N, une classe de résistance à court terme élevée, notée R, et une classe de faible résistance à court terme, notée L. [19].

**III.4.2.2 But :** La résistance d'un mortier est directement dépendante du type donc, il s'agit de définir la qualité de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

#### III.4.2.3 Les Conditions de l'essai:

1. Salle de température  $20\text{C}^{\circ} \pm 2 \text{C}^{\circ}$
2. Humidité relative supérieure ou égale 50%
3. Armoire humide maintenue à une température  $20\text{C}^{\circ} \pm 1 \text{C}^{\circ}$  et humidité relative supérieure à 90%.

**III.4.2.4 Préparation du mortier:** La composition du mortier à tester est le suivant :

- 450 g $\pm$  2g de ciment.
- 1350 g  $\pm$ 5g sable normalisé.
- 225 ml  $\pm$ 1ml eau distillé.

**III.4.2.4.1 Mode opératoire:**

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment soigneusement.
- Mettre alors le malaxeur en marche à petite vitesse.
- Après 30 seconde, introduire le sable normalise et continuer à malaxer pendant autres 30 s.
- Arrêter le malaxeur pendant 1min30s pendant les 15 première secondes, enlever à l'aide d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérant aux parois et au fond vers le milieu de celui-ci.

**III.4.2.5 Préparation des éprouvettes :**

**III.4.2.5.1 Mode opératoire :**

- Préparer une série des moules de dimensions 4 $\times$ 4 $\times$ 16 cm.



**Figure III.19** Moule des Mortier

- Le moule et sa hausse fermement fixes à la table à choc.
- Remplir avec précaution à l'aide d'une cuillère convenable, le moule à moitié et dans chaque compartiment de celui-ci.
- Etaler la couche uniformément en utilisant une spatule adéquate (la tenir verticalement et avec des mouvements de va et vient)
- Démarrer ensuite l'appareil a choc pour 60coups
- Introduire la seconde couche, niveler avec la spatule et démarrer l'appareil pour 60 autre coups



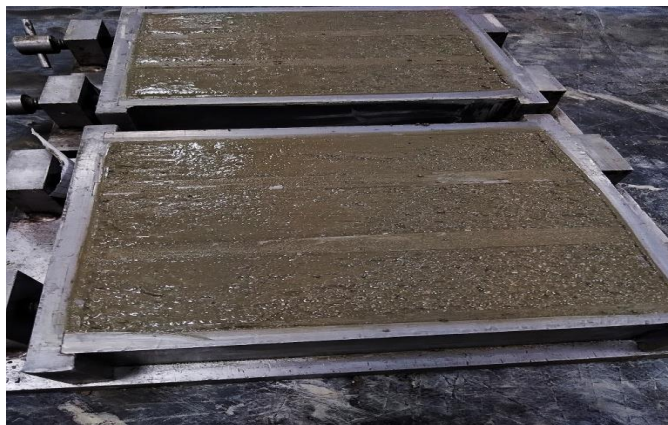


Figure III.20 Table à choc

- Retirer avec précaution le moule de la table et ôter la hausse, enlever immédiatement l'excès de mortier avec une règle métallique plate .anime de lents mouvement.



- Lisser la surface des éprouvettes en tenant la règle presque à plat



- Etiqueter les moules pour identification



Conservation des moules et des éprouvettes

- Placer sans tarder les moules dans une armoire humide à régulation de température pendant 24h

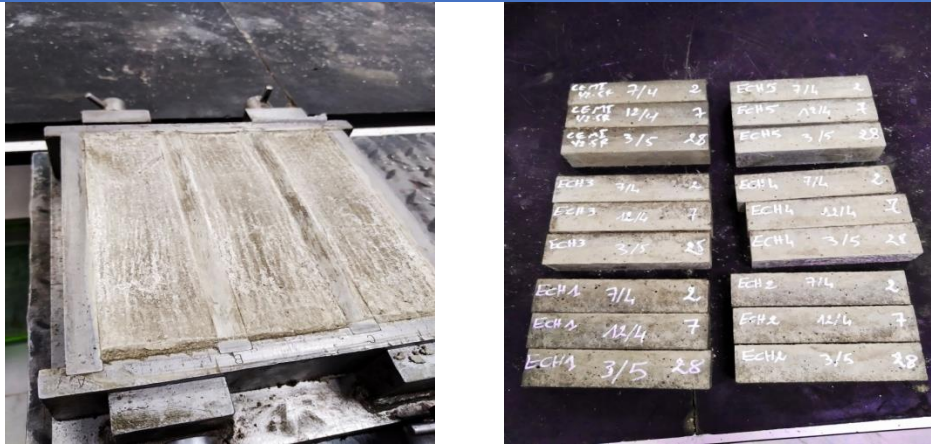


Figure III.21 Les éprouvettes démoulées



Figure III.22 Armoire Humide

- Après 24h de cure ainsi faire sortir le moule et procéder au démoulage des éprouvettes.
- Immerger sans tarder les éprouvettes dans un bain d'eau à régulation de température à 20°C, 1 L'éprouvette pour 2 jours, 1 éprouvette pour 7 jours et 1 éprouvette pour 28 jours. [23]

#### III.4.2.6 Essais des éprouvettes

L'essai a pour but de déterminer la résistance mécanique à la flexion et compression aux âges 02, 07, 28 jours.

##### III.4.2.6.1 Résistance à la flexion

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui.
- Appliquer la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à Rupture

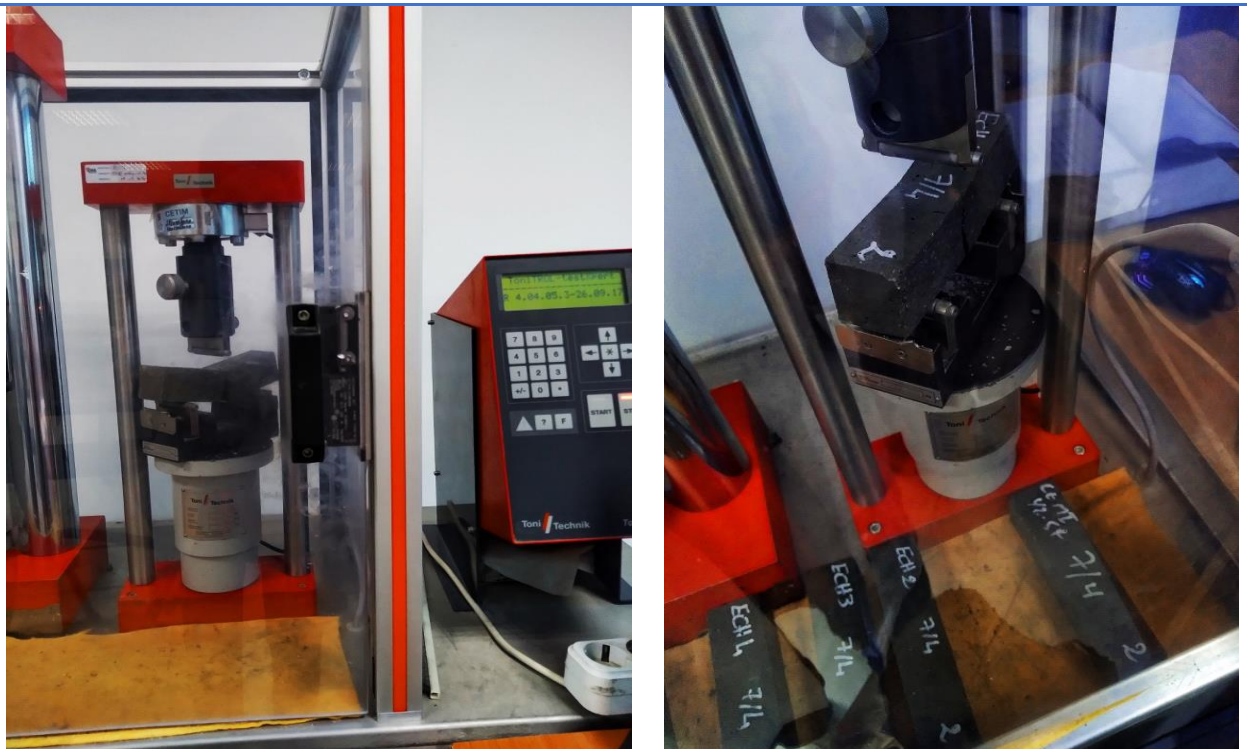


Figure III.23 Appareil de résistance à la flexion.

**III.4.2.6.2. Résistance à la compression**

1. Placer le demi-prisme en compression sur les faces latérales de moulage.
2. Centrer chaque demi-prisme dans le compartiment d'essai.
3. Applique la charge verticalement et faire augmenter uniformément la charge jusqu'à rupture. La résistance est en MPa.



**Figure III.24** Appareil de résistance à la compression

## CHAPITRE IV

### RESULTATS ET DISCUSSIONS



« La détermination d'aujourd'hui mène au succès de demain »

Ce chapitre résume les résultats des analyses qui ont été réalisées au niveau des laboratoires d’analyses physicomécaniques de cimenterie BISKRIA, ainsi que les analyses chimiques qui ont été réalisées sur cinq échantillons de ciment (clinker OPC– gypse) afin d’étudier l’impact de la finesse sur ceux -ci.

**IV.1 PREPARATION D’ECHANTILLONS**

Les compositions de mélange CLINKER - GYPSE utilisées dans ce travail sont récapitulées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1:** Résultats de préparation d’échantillon

	CLINKER	GYPSE
SO <sub>3</sub> %	1.014	35.643
Pourcentage %	94.26	5.73
Poids (g)	4713	286.5
masse de mélange	4999.2 g	

La masse de mélange utilisé est de 4999.2g contient 5.73% de composition de GYPSE.

**IV.2 ANALYSES PHYSIQUE**

**IV.2.1 Surface spécifique de Blaine (SSB)**

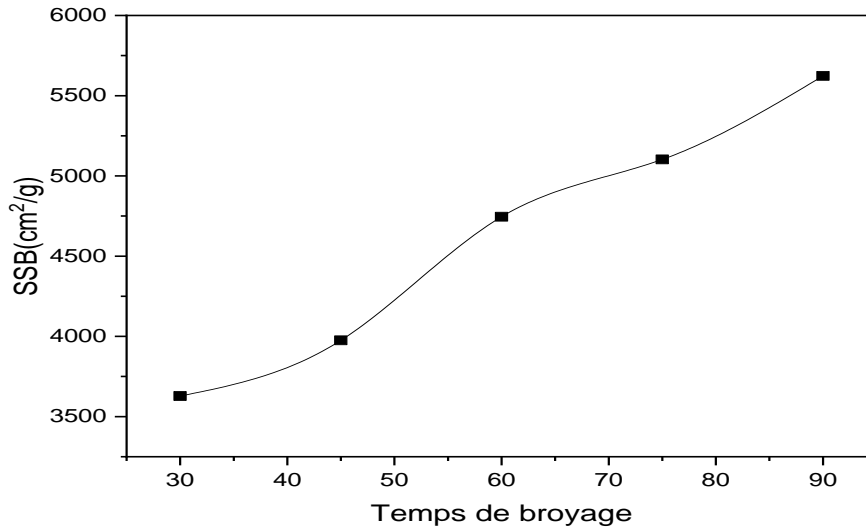
La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Le tableau IV.2 représente les valeurs de la surface spécifique de Blaine (SSB) en fonction du temps de broyage de mélange CLINKER – GYPSE préparés.

**Tableau IV.2 :** Résultats de surface spécifique de Blaine (SSB)

Echantillon	1	2	3	4	5
<b>Temps de broyage (min)</b>	30	45	60	75	90
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	3628.1	3975.4	4745.5	5103	5623.6
<b>Norme</b>	≥ 2000				

On marqué que Surface Spécifique de Blaine augmente avec l’augmentation du temps de broyage, ce qui signifie que plus le temps de broyage est élevée, plus la finesse est élevée et donc

le SSB est élevée. Dans le cinquième échantillon on remarque une élévation de SSB car le ciment est très finement broyé, ce qui entraîne une obstruction du passage de l'air entre les grains de ciment.



**Figure IV.1 :** Evolution de la Surface Spécifique de Blaine en fonction de temps de broyage

#### IV.2.2 Le Refus

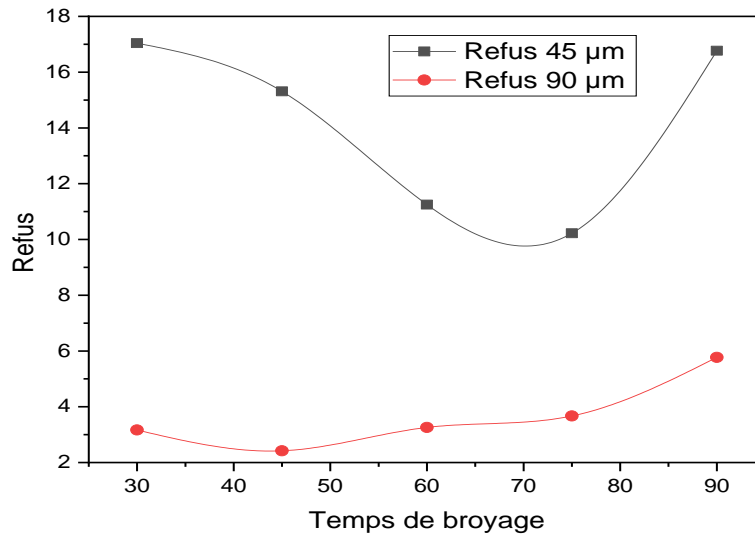
La détermination du pourcentage des refus de ciment se fait après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

Dans cette étude le refus est déterminé sur des tamis de 45 µm et 90 µm. les résultats de refus de l'échantillon pour chaque temps de broyage est montre dans le tableau IV.3 et présenté par la figure IV.2

**Tableau IV.3 :** Résultats de Refus

Echantillon	Temps de broyage	Refus 45 µm					Refus 90 µm			
		Essais1	Essais 2	Essais 3	Essais 4	MOY(g)	Essais1	Essais 2	Essais 3	MOY(g)
1	30 min	16.4	17.74	16.83	17.20	<b>17.04</b>	3.13	3.12	3.20	<b>3.17</b>
2	45min	11.74	17.52	16.81	15.17	<b>15.31</b>	2.46	2.45	2.35	<b>2.42</b>
3	60min	10.80	11.25	11.12	11.84	<b>11.25</b>	3.33	3.24	3.22	<b>3.26</b>
4	75min	10.66	9.95	9.69	10.58	<b>10.22</b>	3.78	3.28	3.97	<b>3.67</b>
5	90min	15.80	15.64	18.64	17.03	<b>16.77</b>	5.65	6.06	5.61	<b>5.77</b>





**Figure IV.2 :** La variation de Refus en fonction de temps de broyage.

La figure IV.2 présente l'effet du temps de broyage sur le refus de tamisage pour 45 µm et 90 µm, on constate que lorsque le temps de broyage augmente de l'échantillon la masse de refus diminue.

Et d'autre part, on remarque que, pour le refus à 45µm et 90µm à temps de broyage 90min une augmentation de la masse de refus rejeté, ceci expliqué par collision entre les boules de fer du broyeur avec la finesse qui donne naissance à des forces électrostatiques qui favorisent l'agglomération des particules de ciment et augmenter le refus en ce stade.

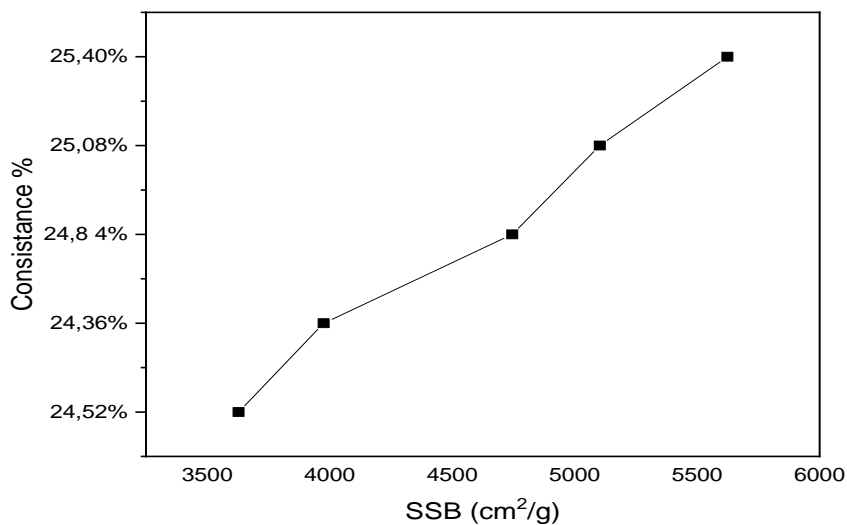
### IV.2.3 La consistance normale de ciment E/C

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme « NA 229 » qui consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte ciment [25].

La consistance est évaluée en mesurant le degré d'enfoncement de la sonde de consistance de l'appareil de Vicat sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est fluide. La consistance évaluée de cette manière est appelée « consistance de Vicat ». Les résultats obtenus de la consistance normale du ciment pour les cinq échantillons étudiés sont présentes dans le tableau suivant :

**Tableau IV.4 :** Evolution de consistance normale du cinq échantillons

Echantillon	1	2	3	4	5
Volume d'eau (ml)	122.6	121.8	123.2	125.4	127
Consistance %	24,52	24,36	24,64	25,08	25,40



**Figure IV.3 :** Courbe d'évolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de la surface spécifique de Blaine (SSB).

La figure IV.3 représente l'évolution de la consistance normale en fonction SSB pour chaque temps de broyage, où l'on constate une augmentation de la demande en eau de la pâte normale afin d'obtenir une consistance normale de la pâte de ciment, cette augmentation explique que la demande accrue en l'eau est directement proportionnelle à la finesse ou plus la finesse de mortier de ciment est élevée, plus la demande en eau est élevée, donc plus le ciment est fin et bien broyé, plus la surface du liant est mouillée.

#### IV.2.4 Le temps de prise

Le début ou la fin de prise dépend de plusieurs paramètres, il varie notamment suivant la composition chimique et la finesse de mouture de ciment étudié, il dépend aussi de la température ambiante et, le cas échéant, des dosages en adjuvant, utilisés à une même température et sans adjuvant, deux ciments différents pourront se distinguer, par une plus ou

moins grande rapidité de prise. L'objectif de l'essai est de définir, pour un ciment donné, un temps qui soit signification de cette rapidité de prise [25].

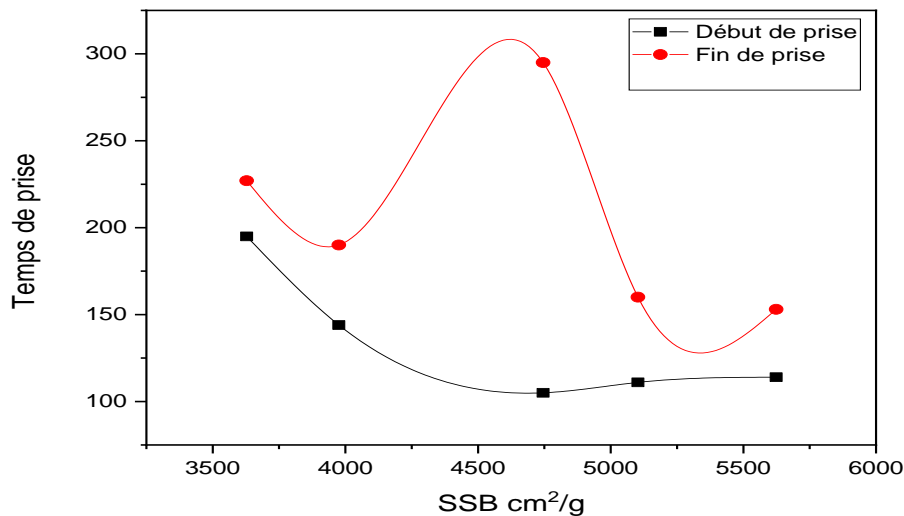
**Le début de prise** : correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température.

**La fin de prise** : correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début du durcissement.

Le tableau IV.5 présente les résultats obtenus du temps de prise pour les cinq échantillons étudiés :

**Tableau IV.5 : Temps de prise**

Echantillon	1	2	3	4	5
<b>Début de prise (min)</b>	195	144	105	111	114
<b>Fin de prise (min)</b>	227	190	295	160	153



**Figure IV.4 : Temps de prise en fonction de SSB (cm²/g)**

La figure IV.4 présente la variation du temps de début de prise et fin de prise en fonction la surface spécifique. Selon la figure, on note que la relation du temps de prise est une relation inverse avec le temps de broyage.

Plusieurs théories expliquent ce phénomène de prise, qui correspond à l'accélération des réactions chimiques d'hydratation du ciment. Ces réactions donnent naissance à des hydrates, qui

sont des microcristaux ayant la forme de fibres, de plaquettes ou d'aiguilles. Des ponts d'hydrates commencent à relier les grains de ciment entre eux.

### IV.3 ANALYSES CHIMIQUE

#### IV.3.1 Spectrométrie de fluorescence X (XRF)

Les compositions chimique pour chaque échantillon étudiés sont représentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.6 :** Les compositions chimique des cinq échantillons par XRF

Composant	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mg O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
1	20,34%	4,62%	3,69%	64,52%	3,96%	2,41%	0,56%	0,15%	0,16%
2	20,53%	4,58%	3,80%	64,66%	3,85%	2,12%	0,56%	0,15%	0,16%
3	20,49%	4,49%	3,89%	64,46%	3,93%	2,25%	0,56%	0,15%	0,16%
4	20,92%	4,44%	3,84%	57,80%	3,78%	2,68%	0,56%	0,13%	0,19%
5	20,97%	4,63%	3,68%	59,08%	3,87%	2,80%	0,58%	0,13%	0,19%

D'après le tableau, on constate que aucun l'effet du temps de broyage sur la composition chimique de ciment.

#### IV.3.2 Perte au feu, Chlore, Chaux libre FCaO :

**Tableau IV.7:** les analyses chimiques obtenues par les cinq échantillons

Echantillon	PAF	Cl %	F Ca O %
1	2,36	0,03%	0,972
2	1,76	0,03%	0,7519
3	1,69	0,03%	0,6266
4	1,86	0,03%	0,9399
5	1,53	0,03%	1,00256

D'après le tableau, on ne constate qu'aucun effet du temps de broyage sur la composition chimique de ciment.

IV.4 ANALYSES MECANIQUE

IV.4.1 Résistance à la Compression et à la flexion

L'évolution des résistances normales à la compression et la flexion est donnée dans le tableau IV.8

Tableau IV.8 : Les résistances à la compression et à la flexion du ciment

Echantillon	Résistance Normale (MPa)					
	2 JOURS		7 JOURS		28 JOURS	
	Flexion	Compression	Flexion	Compression	Flexion	Compression
1	4.0	23.0	5.7	36.6	8.2	46.2
2	5.4	27.6	6.9	42.5	8.9	54.2
3	4.7	28.1	6.3	41.1	8.3	48.5
4	5.3	28.7	7.3	42.7	7.6	55.2
5	5.5	30.1	6.0	42.8	7.8	55.0

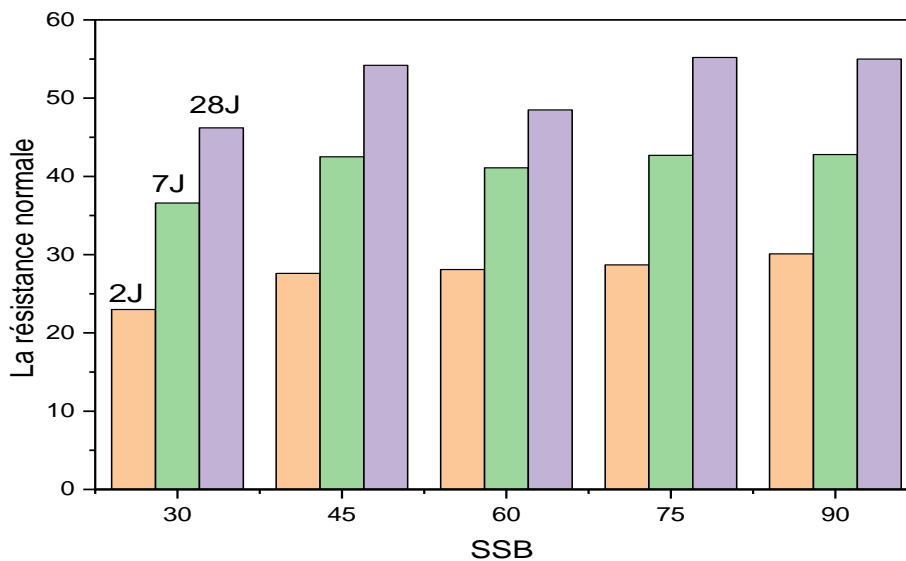


Figure IV.5 : Histogramme de la résistance normale à la compression et à la flexion en fonction de SSB (cm²/g).

L'histogramme présente les résultats des analyses mécaniques effectuées sur les mortiers de cinq échantillons dans le but d'étudier la résistance normale de ciment.

On remarque une augmentation de la résistance, où plus la finesse est grande plus la compression est grande, c'est -à-dire une augmentation de la résistance normale. La résistance

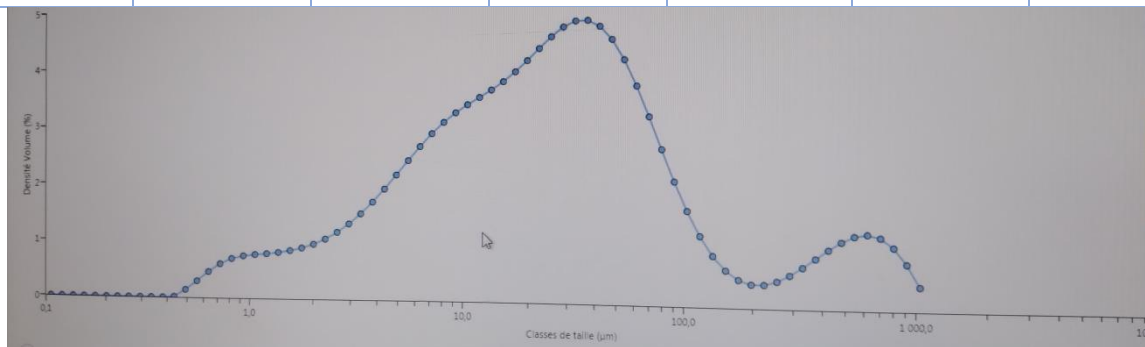
normale dans le cinquième échantillon est très élevée car il s’agit d’un type de ciment très bien broyé avec un bon temps de début de prise et une bonne résistance normale , par conséquent, la surface spécifique de Blaine a un effet sur la résistance normale , plus qu’elle est élevée plus que la résistance est optimale ,sachant que le broyage est le facteur fondamental dans ce travail, car plus le temps de broyage est long donc la surface spécifique du Blaine est élevée.

**IV.4.2 Granulométrie laser - PSD**

**IV.4.2.1 Echantillon 1 :30min**

**Tableau IV.9 :** Résultats de granulométrie laser –PSD sur l’échantillon 1

ECH 1	DX 10 $\mu m$	DX 25 $\mu m$	DX 50 $\mu m$	DX 75 $\mu m$	DX 90 $\mu m$	Surface Spécifique
<b>1</b>	3.67	10.3	31.7	115	997	218.6
<b>2</b>	3.50	10.1	33.9	174	982	223.1
<b>3</b>	3.36	9.82	35.0	191	987	227.7
<b>Moyen</b>	3.51	10.1	33.4	160	989	223.1



**Figure IV.6 :** Courbe des résultats d’échantillon 1

La diffraction laser mesure les distributions granulométriques des particules en mesurant la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée lorsqu'un faisceau laser traverse un échantillon de particules dispersées, on a la courbe ci-dessus représentée la densité volume

(en %) d’échantillon 1 en fonction de classes de taille ( en  $\mu m$  ) on note la présence d’un grand nombre de particules dans la gamme ( 10  $\mu m$  -100  $\mu m$  ) jusqu'à ce qu'elle atteignent leur valeur maximale en DX<sub>90  $\mu m$</sub>  , qui est estimé à 989 $\mu m$  sachant que la taille des particules représente le diamètre de la sphère équivalente ayant même volume que la particule.



IV.4.2.2 Echantillon 2 : 45 min

Tableau IV.10: Résultats de granulométrie laser –PSD sur l’échantillon 2

ECH 2	DX 10 $\mu\text{m}$	DX 25 $\mu\text{m}$	DX 50 $\mu\text{m}$	DX 75 $\mu\text{m}$	DX 90 $\mu\text{m}$	Surface Spécifique
<b>1</b>	3.36	9.63	50.1	531	1310	226.0
<b>2</b>	3.09	8.75	33.5	346	1150	242.6
<b>3</b>	2.79	7.77	25.2	139	864	266.1
<b>Moyen</b>	3.06	8.64	32.8	327	1130	244.9

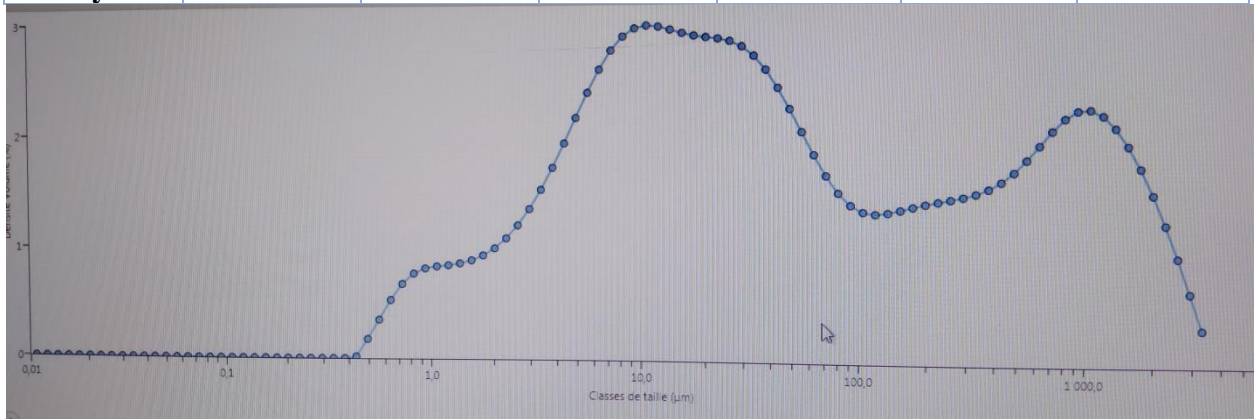


Figure IV.7 : Courbe des résultats d’échantillon 2

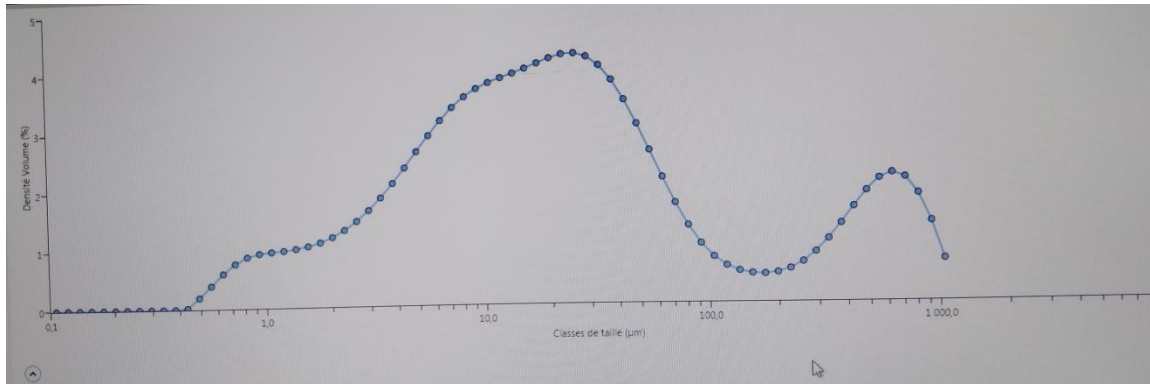
Pour cet échantillon en peut deviser cette courbe en trois partie:

- 5% des particules de l’échantillon sont inférieure ou égales à 3.06  $\mu\text{m}$  et 8.64 respectivement
- 60% qui sont le plus grand pourcentage de particules dans l’échantillon est concentré dans le diamètre DX90 $\mu\text{m}$ , où le nombre de particules atteint 1130.
- 35% des particules sont égales ou inférieure à 32.8  $\mu\text{m}$  et 327  $\mu\text{m}$  respectivement.

IV.4.2.3 Echantillon 3 :60 min

Tableau IV.11 : Résultats de granulométrie laser –PSD sur l’échantillon 3

ECH 3	DX 10 $\mu\text{m}$	DX 25 $\mu\text{m}$	DX 50 $\mu\text{m}$	DX 75 $\mu\text{m}$	DX 90 $\mu\text{m}$	Surface Spécifique
<b>1</b>	2.58	6.92	19.0	50.9	448	292.8
<b>2</b>	2.54	6.81	18.7	49.4	426	296.1
<b>3</b>	2.58	6.92	19.0	51.0	445	292.7
<b>Moyen</b>	2.63	7.03	19.3	52.5	468	289.5



**Figure IV.8:** Courbe des résultats d'échantillon 3

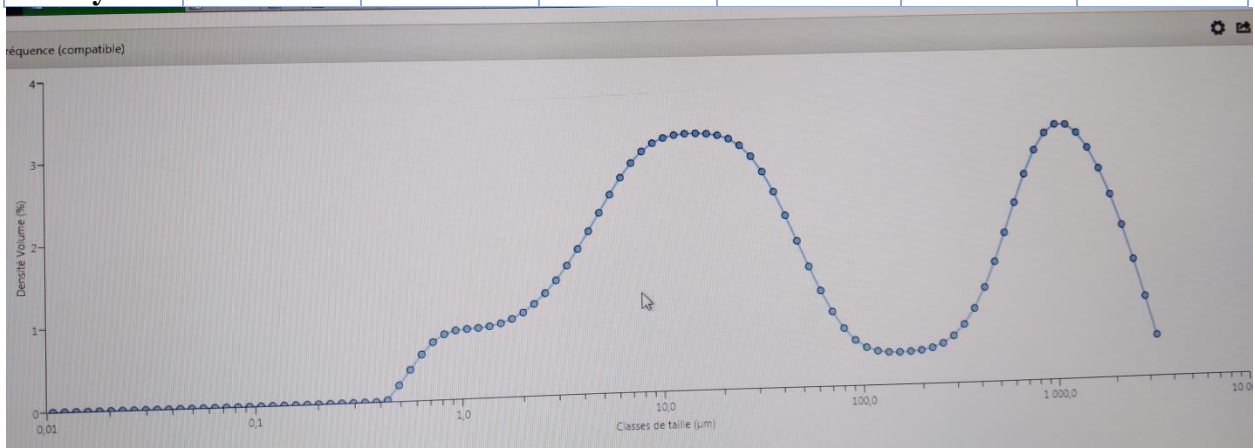
Pour cet échantillon :

- (10 µm \_100 µm) Présence d'un grand nombre de particules dans cette zone jusqu'à atteindre en DX<sub>90µm</sub> une limite de 468 µm.
- (100 µm- 1200 µm) la présence d'un autre pic exprimant le nombre de particules en DX<sub>75µm</sub> où il atteint 52.5µm.

**IV.4.2.4 Echantillon 4 : 75 min**

**Tableau IV.12:** Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 4

ECH 4	DX 10 µm	DX 25 µm	DX 50 µm	DX 75µm	DX 90 µm	Surface Spécifique
<b>1</b>	2.95	8.23	28.0	690	1480	253.5
<b>2</b>	2.80	7.82	25.5	623	1430	264.1
<b>3</b>	3.10	8.70	30.3	781	1550	244.2
<b>Moyen</b>	2.94	8.23	27.8	702	1490	253.9



**Figure IV.9:** Courbe des résultats d'échantillon 4

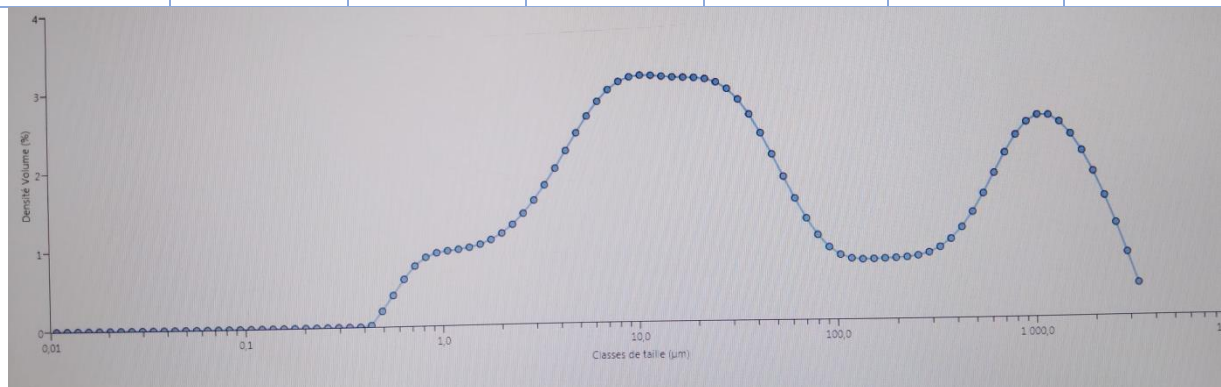
Pour cet échantillon en peut deviser cette courbe en deux partie :

- (10  $\mu\text{m}$  \_100  $\mu\text{m}$ ) Présence d'un grand nombre de particules dans cette zone jusqu'à atteindre en DX<sub>90 $\mu\text{m}$</sub>  une limite de 1490 $\mu\text{m}$  .
- (100  $\mu\text{m}$ - 1200  $\mu\text{m}$ ) la présence d'un grand autre pic exprimant le nombre de particules en DX<sub>75 $\mu\text{m}$</sub>  où il atteint 702 $\mu\text{m}$ .

**IV.4.2.5 Echantillon 5 :90 min**

**Tableau IV.13** : Résultats de granulométrie laser –PSD sur l'échantillon 5

ECH 5	DX 10 $\mu\text{m}$	DX 25 $\mu\text{m}$	DX 50 $\mu\text{m}$	DX 75 $\mu\text{m}$	DX 90 $\mu\text{m}$	Surface Spécifique
<b>1</b>	2.65	7.41	25.5	384	1270	273.3
<b>2</b>	2.81	7.90	28.5	571	1390	260.5
<b>3</b>	2.49	7.00	23.3	259	1210	286.0
<b>Moyen</b>	2.64	7.42	25.6	411	1300	273.3



**Figure IV.10:** Courbe des résultats d'échantillon 5

Pour cet échantillon: L'émergence de 50 % des nouvelles particules dans la gamme (130  $\mu\text{m}$ - 1250  $\mu\text{m}$ ), où le diamètre de sphère équivalent dans DX<sub>75 $\mu\text{m}$</sub>  atteint 411 $\mu\text{m}$ .

# CONCLUSION GENERALE



Après cette étude, nous nous sommes intéressés à étudier l'impact de la finesse de ciment sur les propriétés chimique, physique et mécanique.

L'un des paramètres le plus important dans la qualité de ciment c'est la finesse, qui est influencé par des facteurs tels que le temps de broyage, le type de ciment, la quantité des ajouts, qualité de clinker ..., et d'autre part elle-même influe sur les propriétés de ciment

Dans ce travail, on a étudié l'effet du temps de broyage sur le ciment préparé à partir du clinker et gypse avec le pourcentage de  $SO_3$  inférieur de 3%, pour avoir l'impact de la finesse sur les caractéristiques du ciment.

L'analyse chimique a été montrée que plus le temps de broyage n'affecte pas sur les propriétés chimiques du ciment.

Au terme de ce travail, Les résultats de cette étude nous montrent que :

- La finesse augmentée la surface spécifique de Blaine SSB
- La finesse diminue le refus
- La finesse augmentée la consistance normale de la pate de ciment
- La finesse diminue le temps de prise (début de prise et fin de prise).
- La finesse augmentée la résistance à flexion et à compression de ciment
- D'après les résultats de granulométrie, le temps de broyage 30 min donne une bonne distribution des particules (échantillon 3), donc 30 min est un temps de broyage suffisant pour obtenir un ciment de meilleure qualité.

Ce travail permet d'améliorer les propriétés physique-mécanique de ciment par la maîtrise de finesse ainsi que l'optimisation de temps de broyage.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE





- | Référence | Titre  |
|-----------|--|
| [1]       | <a href="https://biskriaciment.com">https://biskriaciment.com</a><br>➤ Date de consultation : 18.05.2022   |
| [2]       | GUESBAYA MOHAMED OUSSAMA; « Etude De Mise En Œuvre D'un Système De Stockage De La Matière Première De Ciment Par Automate S7-300» ; Mémoire Magister ; Université Mohammed Khider –Biskra ; 2018.  |
| [3]       | AKACHA IMANE ;«Impact Des Alcalis Sur Les Performances De Ciment » ;Mémoire De Magister ;Université Mohammed Khider-Biskra ;2020.  |
| [4]       | ZIAT NAHLA ; « Etude Des Caractéristiques Physiques Et Mécaniques Du Ciment Portland » ; Mémoire De Magister ; Département De Technologie Chimique Industrielle Université De Bouira ; 2020.   |
| [5]       | <a href="https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/81-cement-definition-and-full-details">https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/81-cement-definition-and-full-details</a> .<br>➤ Date de consultation : 20.02.2022   |
| [6]       | <a href="https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/ciments-c920">https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/ciments-c920</a> .<br>➤ Date de consultation : 20.02.2022 |
| [7]       | MADOUI YASMINE ; «Le Recyclage D'un Déchet Industriel (Poussière De By-Pass) » ;Mémoire De Magister ; Université Mohammed Khider –Biskra ; 2019.   |
| [8]       | Document Lafarge Ciments Centre de Viviers Service formation. Algérie juin 2014  |
| [9]       | MAHDI BEN HAMZA ;«Etude D'un Systeme Automatique Par Un Filtre A Manche De Cimenterie Par S7-300» ;Mémoire Magister, ;Université Mohamed Khider Biskra ;2018.  |
| [10]      | BITAR ZEYNEB ;«Influence De La Surface Spécifique Des Ciments Aux Ajouts Minéraux (Calcaire) Sur Le Comportement Mécanique Du Mortier» Mémoire De Magister ;Université Mohamed Boudiaf - M'sila ;2018.   |
| [11]      | NJOYA MAMA ; « Amélioration Du Processus De Broyage Des Matières Premières En Ciment A La Cimbenin S.A».Ecole Polytechnique D'abomey-Calavi ;2018.   |
| [12]      | <a href="https://www.retsch.fr/fr/produits/broyer/?gclid=CjwKCAjwkMeUBhBuEiwA4hpqEEyhXsZiA3pdYk6DbfNf7aY6S1FXolRIL8wdDwJkWb4VvN0koAL_hoC1KsQAvD_BwE">https://www.retsch.fr/fr/produits/broyer/?gclid=CjwKCAjwkMeUBhBuEiwA4hpqEEyhXsZiA3pdYk6DbfNf7aY6S1FXolRIL8wdDwJkWb4VvN0koAL_hoC1KsQAvD_BwE</a>  |

- Date de consultation : 28.05.2022
- [13] <https://www.gebr-pfeiffer.com/fr/produits/broyeur-a-galets-mps>  
 ➤ Date de consultation : 28.05.2022
- [14] Nabila BOUALLA ;«Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physicochimiques des ciments» mémoire de licence ; Université des sciences et de la technologie d'Oran ; 2011 .
- [15] BOUCHENAFAOthmane,HAMZAOUIRabah,BENNABIAbelkrim,ColinJohan ; «Optimisation d'un procédé de broyage à haute énergie de laitiers pour une substitution partielle du clinker dans la confection de pâtes cimentaires». Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, 28 avenue du Président Wilson, 94234 Cachan, France ;2017.
- [16] Brigadier General Md Gazi Ferooz Rahman;«Fineness Of Indigenous Cements Of Bangladesh And Its Effects On Initial And Final Settings»;Institute Of Science & Technology,Bangladesh; 2012.
- [17] <https://www.cmesmat.fr/actualites-conseils/prise-et-durcissement-du-ciment-quelles-differences>  
 ➤ Date de consultation : 23.02.2022
- [18] <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-et-proprietes-des-ciments>  
 ➤ Date de consultation : 23 .02.2022
- [19] M. GHOMARI et Mme BENDI-OUISA «Consistance Normale & Prise» ; Université Aboubekr Belkaid Tlemcen ; 2008.
- [20] <https://www.cmesmat.fr/actualites-conseils/prise-et-durcissement-du-ciment-quelles-differences>  
 ➤ Date de consultation: 15.05.2022
- [21] <https://analyses-surface.com/laboratoire-analyse-granulometrique-laser.html/>  
 ➤ Date de consultation : 16.05.2022
- [22] Document de BISKRIA ciment.
- [23] <https://www.chauxflash.be/2015/11/15/la-chaux-libre/#:~:text=La%20teneur%20en%20chaux%20libre,oxyde%20et%20hydroxyde%20de%20calcium>  
 ➤ Date de consultation : 16.05.2022

- [24] Ministère des travaux publics France.. Commission des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction ; Première session, Partie 1 ; édition Imprimerie Nationale, p273. 1894

# ANNEXE

## L'EXIGENCE DE CIMENT

La définition de chaque ciment inclut les proportions dans lesquelles les constituants doivent être associés pour produire ces produits différents dans une plage de neuf (9) classes de résistance.

Le présent règlement technique définit également les exigences que les constituants doivent satisfaire telles que les exigences mécaniques, physiques et chimiques y compris, le cas échéant, les exigences relatives à la chaleur d'hydratation applicables à ces 27 produits et aux classes de résistance.

### 1-Exigences à satisfaire

Le tableau 1 ci-dessous, donne les 27 produits de la famille des ciments courants traités dans ce présent règlement ainsi que leurs notations. Ils sont regroupés en cinq (5) types principaux :

- Type 1: CEM I Ciment Portland.
- Type 2 : CEM II Ciment Portland composé.
- Type 3 : CEM III Ciment de haut fourneau.
- Type 4 : CEM IV Ciment pouzzolanique .
- Type 5 : CEM V Ciment composé.

### 2- Exigences chimiques

Déterminées conformément aux normes citées dans la colonne 2 du tableau 2

### 3-Exigences mécaniques

#### Résistance courante :

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme NA 234, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau ci-dessous.

#### Résistance à court terme

La résistance à court terme d'un ciment est la résistance à la compression, déterminée conformément à la norme NA 234, à 2 ou 7 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau 3.

**4- Exigences physiques :****Temps de début de prise**

Déterminé selon la NA 230, le temps de début de prise doit satisfaire aux exigences du tableau ci-dessus.

**Stabilité (expansion)**

Déterminée selon la NA 230, l'expansion doit satisfaire aux exigences du tableau 3 ci-dessus.

**Chaleur d'hydratation**

La chaleur d'hydratation des ciments courants à faible chaleur d'hydratation ne doit pas dépasser la valeur caractéristique de 270 J/g, déterminée selon la NA 5097 à 7 jours ou selon la NA 5061 après 41 heures.

Les ciments courants à faible chaleur d'hydratation sont désignés par les lettres (LH).



**Tableau 1: les 27 produits de la famille des ciments courants**

principaux types			Composition ( pourcentage en masse a) )										
			Constituants principaux										
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire		Constituants secondaires
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcaire		L	LL	
Nomination des 27 produits (types de ciments courants)			K	S	D b)	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		Ciment Portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—
Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/B-S		65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
Ciment Portland aux cendres volantes		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
Ciment Portland au calcaire		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
	Ciment Portland composé c)	CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
Ciment Portland composé c)		CEM II/A-M	80-94	12-20								0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35								0-5		
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	—	11-35				—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	36-55				—	—	—	0-5	
CEM V	Ciment composé c)	CEM V/A	40-64	18-30	—	12-20			—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	21-35			—	—	—	0-5	

**Tableau 2 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques**

1	2	3	4	5
Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences
Perle au feu	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Résidu insoluble	NA 5042	CEM I CEM III	Toutes classes	≤ 5,0 %
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	NA 5042	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III	Toutes classes	
Teneur en chlorure	NA 5042	Tous types	Toutes classes	≤ 0,10 %
Pouzzolanicié	NA 1952	CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

**Tableau 3 : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques**

Classe de résistance	Résistance à la compression Mpa			Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours	min	m m
32,5 L <sup>a</sup>	-	≥ 12.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75
32,5 N	-	≥ 16.0			
32,5 R	≥ 10.0	-			
42,5 L <sup>a</sup>	-	≥ 16.0	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60
42,5 N	≥ 10.0	-			
42,5 R	≥ 20.0	-			
52,5 L <sup>a</sup>	≥ 10.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45
52,5 N	≥ 20.0	-			
52,5 R	≥ 30.0	-			

a - Classe de résistance uniquement pour les ciments CEM III.

